

IKSR/KHR Expertengruppe

Comité Commun d'experts de la CIPR et de la CHR

Alarmmodell Rhein

Ein Modell für die operationelle Vorhersage des Transportes von Schadstoffen im Rhein

Redaktion:

**M. Spreafico
A. van Mazijk**

Mit Beiträgen von:

**M. Adler
A. Jakob
H. Hanisch
Ch. Leibundgut
A. van Mazijk
M. Spreafico
H. Wiesner**



**Bericht Nr. I-12 der KHR
Rapport no. I-12 de la CHR**

Internationale Kommission zum Schutze des Rheins
gegen Verunreinigung

Commission Internationale pour la Protection du
Rhin contre la Pollution

Internationale Kommission für die Hydrologie des
Rheingebietes

Commission Internationale de l'Hydrologie du bas-
sin du Rhin

Comité Commun d'experts de la CIPR et de la CHR

Alarmmodell Rhein Ein Modell für die operationelle Vorhersage des Transportes von Schadstoffen im Rhein

M. Adler - Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
A. Jakob - Landeshydrologie und -geologie, Bern
H. Hanisch - Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
Ch. Leibundgut - Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg i.Br.
A. van Mazijk - Technische Universität, Delft
M. Spreafico - Landeshydrologie und -geologie, Bern
H. Wiesner - Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg i.Br.



IKSR | CIPR
Sekretariat | Secrétariat
Postfach 309
D-56003 Koblenz
Deutschland | Allemagne

CHR | KHR
Sekretariat | Secrétariat
Postbus 17
NL-8200 AA Lelystad
Niederlande | Pays-Bas

Bericht Nr. I-12 der KHR
Rapport no. I-12 de la CHR

Originalsprachen: deutsch und niederländisch
Langues originales: allemand et néerlandais

© 1993, CHR/KHR
ISBN 90-70980-18-5

Alarmmodel „Rijn”

**Een model voor de operationele voorspelling van
het transport van verontreinigende stoffen in de Rijn**

Nederlandstalige gedeelten:

Overzicht: blz. 19

Bijzonderheden CHR: blz. 121

Alarm model ‘Rhine’

**A model for the operational prediction of the
transport of pollutants in the river Rhine**

English texts:

Outline: p. 19

Particulars CHR: p. 121

CIP-GEGEVENS KONINKLIJKE BIBLIOTHEEK, DEN HAAG

Alarmmodell

Alarmmodell Rhein: ein Modell für die operationelle
Vorhersage des Transportes von Schadstoffen im Rhein /
IKSR/KHR Expertengruppe ; Red.: M. Spreafico, A. van
Mazijk ; mit Beiträgen von: M. Adler ... [et al.]. -
Lelystad : CHR/KHR. - Ill. (Rapport / Commission
Internationale de l'Hydrologie du Bassin du Rhin =
Bericht / Internationale Kommission für die Hydrologie
des Rheingebietes. I de la CHR = I der KHR; Nr. 12)
Teksten in het Duits, Nederlands en Engels. Met lit.
opg.

ISBN 90-70980-18-5

Trefw.: hydrologie ; Rijn / waterverontreiniging ; Rijn.

Vorwort

In den vergangenen Jahren wurde das Wasser des Rheins öfters durch Unfälle verschmutzt, was zu größeren Schäden am Ökosystem und zu Beeinträchtigungen der Wassernutzung geführt hat. Um solche Störfälle möglichst zu verhindern oder mindestens deren Schadenausmaß möglichst gering zu halten, wird versucht, durch geeignete Vorsorgemaßnahmen bei den potentiellen Verursachern das Unfallrisiko zu reduzieren. Da trotzdem Unfälle nicht ausgeschlossen werden können, betreibt die Internationale Kommission zum Schutze des Rheins gegen Verunreinigung ein Alarmsystem im Falle von Gewässerverschmutzungen. Dieses System hat zum Ziel, die verantwortlichen Stellen der Rheinanliegerstaaten bei Störfällen im Rhein frühzeitig zu informieren und nötigenfalls zu warnen. Für die Beschaffung und Weitergabe solcher Angaben benötigen die Hauptwarnzentralen real-time Informationen über qualitative und quantitative Parameter von Meßstationen, sowie Stofftransportmodelle, mit deren Hilfe sie den Transport von Schadstoffen im Rhein berechnen und vorhersagen können.

Deshalb haben im Jahre 1988 die Minister der Rheinanliegerstaaten die Internationale Kommission zum Schutze des Rheins gegen Verunreinigungen und die Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes mit der Entwicklung von Methoden und Modellen für die Vorhersage des Schadstofftransportes im Rhein beauftragt. Unter der Leitung einer Expertengruppe wurden hiezu neue Modelle entwickelt, resp. bestehende auf den Rhein und dessen Nebenflüssen Aare und Mosel adaptiert und dieselben den Hauptwarnzentralen zur Verfügung gestellt, welche sie heute operationell einsetzen.

Der vorliegende Schlußbericht faßt die ausgeführten Arbeiten zusammen und gibt dem Interessierten einen Überblick über die Problematik, die hydraulischen Fließzeitberechnungen, die Tracerversuche für die Kalibrierung und Verifikation des Alarmmodelles sowie über das entwickelte Alarmmodell.

Allen Mitarbeitern aus den Ländern Schweiz, Deutschland, Frankreich und den Niederlanden sei an dieser Stelle bestens gedankt. Die Zusammenarbeit ist äußerst kooperativ verlaufen und hat sich auch befruchtend auf die einschlägigen Tätigkeiten in den einzelnen Ländern ausgewirkt. Die Zusammenarbeit zweier Flußgebietskommissionen hat sich bewährt und kann als wegweisend für die Bewältigung gemeinsamer Probleme angesehen werden.

Der Präsident der KHR
Dr. M. Spreafico

INHALTSVERZEICHNIS

	<i>Vorwort</i>	3
1.	ÜBERSICHT (Deutsch) M. Spreafico	7
1.1	Ausgangslage	7
1.2	Problembeschreibung und Auflagen an das Alarmmodell für den Rhein	11
1.3	Organisation und Abwicklung der Arbeiten	11
1.4	Das Alarmmodell für die Vorhersage der Stoffausbreitung im Rhein	13
1.5	Wertung des Alarmmodelles	17
1.	OVERZICHT (Nederlands)	19
1.1	Uitgangspunt	19
1.2	Probleembeschrijving en aan het Rijnalarmmodel gestelde eisen	23
1.3	Organisatie en uitvoering van de werkzaamheden	25
1.4	Het alarmmodel voor de voorspelling van stofverspreiding in de Rijn	27
1.5	Beoordeling van het alarmmodel	34
1.	OUTLINE (English)	19
1.1	Starting point	19
1.2	Problem definition and requirements for the Rhine alarm model	23
1.3	Organization and execution of activities	25
1.4	The alarm model for the prediction of substance propagation in the River Rhine	27
1.5	Evaluation of the alarm model	34
1.6	Literaturübersicht / Literatuur / Bibliography	36
2.	DIE INTEGRATION DES ALARMMODELLES IN DAS ALARMSYSTEM RHEIN M. Spreafico	41
3.	HYDRAULISCHE GRUNDLAGEN A. Jakob, M. Adler, A. van Mazijk	43
3.1	Strukturierung der Flußläufe	43
3.2	Hydraulische Berechnungen der Fließzeiten im Hochrhein und in der Aare . .	43
3.2.1	Abfluß-Wasserstand-Beziehungen	49
3.2.2	Fließzeitenberechnungsprogramm FLORIS	50
3.2.3	Durchgeführte Berechnungen und deren Wertung	51
3.2.4	Zukunftsperspektiven	53
3.2.5	Literatur	53
3.3	Die Fließzeiten in Ober-,Mittel- und Niederrhein, sowie in der Mosel	54
3.4	Die Fließzeiten in den niederländischen Rheinzweigen	57
4.	BESCHAFFUNG VON EINGABEDATEN MITTELS TRACERVERSUCHEN H. Wiesner, Ch. Leibundgut, H. Hanisch	59
4.1	Einleitung und Methodik	59
4.1.1	Einleitung	59

4.1.2	Tracerversuche und Rheinalarmmodell	60
4.1.3	Einspeisung	61
4.1.4	Probenahme und Analyse	61
4.1.5	Abflußwerte und Tracerfrachten	62
4.2	Versuche in der Schweiz	64
4.2.1	Untersuchte Flußstrecken	64
4.2.2	Abflußverhältnisse	64
4.2.3	Stofftransportgeschwindigkeiten	64
4.2.4	Tracerfrachten	66
4.2.5	Spezielle Arbeiten	67
4.3	Versuche in Deutschland und den Niederlanden	67
4.3.1	Untersuchte Flußstrecken	67
4.3.2	Abflußverhältnisse	68
4.3.3	Stofftransportgeschwindigkeiten	69
4.3.4	Tracerfrachten	72
4.3.5	Spezielle Arbeiten	75
4.4	Versuche in Frankreich	76
4.4.1	Untersuchte Flußstrecken	76
4.4.2	Abflußverhältnisse	76
4.4.3	Stofftransportgeschwindigkeiten	77
4.4.4	Tracerfrachten	79
4.5	Schlußfolgerungen, Empfehlungen und Ausblick	80
4.6	Literatur	81
5.	DAS ALARMMODELL RHEIN	83
	A. van Mazijk	
5.1	Einleitung	83
5.2	Mathematische Modellentwicklung	85
5.2.1	Taylor-Modell (Version 1.0)	85
5.2.2	Stillwasserzonenmodell (Version 2.0 und 2.1)	87
5.3	Kalibrierungs- und Verifikationsverfahren	89
5.3.1	Einführung	89
5.3.2	Markierstoffmengen	89
5.3.3	Kalibrierung der Parameter	89
5.4	Kalibrierungsergebnisse	91
5.4.1	Kalibrierung der Hochrheinstrecke	91
5.4.2	Kalibrierung der Ober-, Mittel- und Niederrheinstrecke	95
5.5	Verifikationsergebnisse	99
5.5.1	Verifikation der Hochrheinstrecke	99
5.5.2	Verifikation der Ober-, Mittel- und Niederrheinstrecke	102
5.6	Schlußfolgerungen	108
5.7	Diskussion	111
5.8	Abkürzungsverzeichnis	112
5.9	Literaturverzeichnis	112
	VERDANKUNGEN	115
	KHR-Veröffentlichungen	117
	Einige Informationen über die KHR (deutsch, französisch, niederländisch und englisch)	119

1. ÜBERSICHT

M. Spreafico

Landeshydrologie und -geologie, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, CH-3003 Bern

1.1 Ausgangslage

Mit einer Einzugsgebietsfläche von 180 000 km² ist der Rhein einer der wasserreichsten und bedeutendsten Ströme Europas und als Schifffahrtsweg zählt er zu den Verkehrsreichsten auf der Erde.

Der 1320 km lange Flußlauf des Rheins ist in sechs größere Teilstrecken zu unterteilen: Die Strecke von der Vereinigung der Hauptquellflüsse Vorder- und Hinterrhein bis zur Einmündung in den Bodensee wird als Alpenrhein bezeichnet. Zwischen Bodensee und Basel spricht man vom Hochrhein, bis Bingen vom Oberrhein und anschließend bis Köln vom Mittelrhein. Von Köln bis Lobith wird er als Niederrhein bezeichnet und nach wenigen Kilometern schließt sich daran das Rheindelta an.

Die größten Nebenflüsse sind: Aare, Ill, Neckar, Main, Lahn, Mosel, Ruhr und Lippe (Abb. 1.1.1).

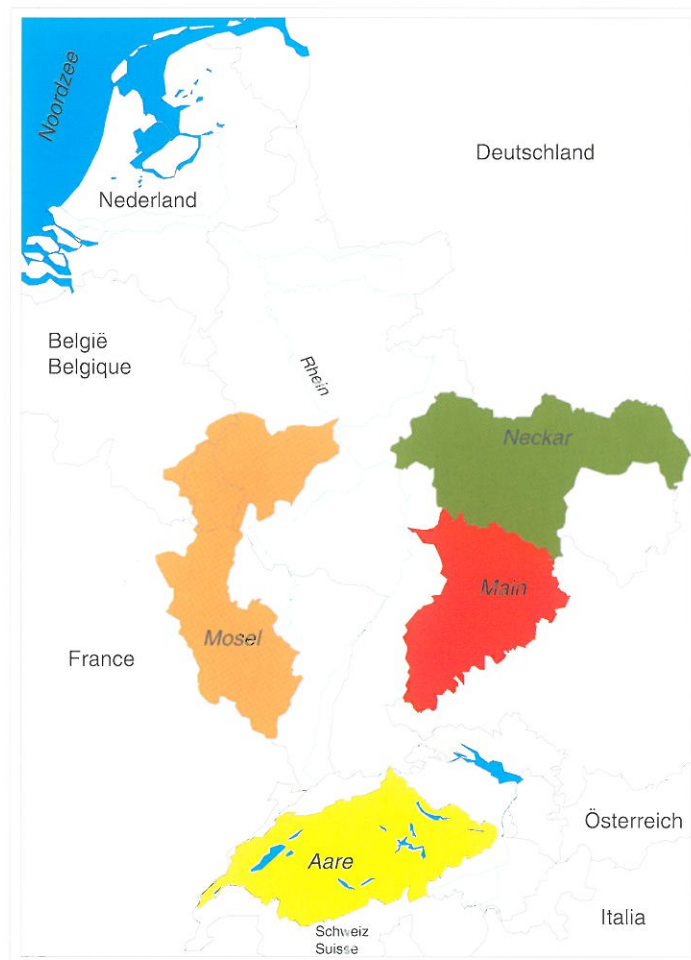


Abb. 1.1.1 Einzugsgebiete des Rheins und seiner wichtigsten Nebenflüsse

Die Längs- und Querprofile des Rheins sind mannigfaltig und stark geprägt vom Landschaftscharakter und von anthropogenen Einflüssen. Die Ausbaurbeiten waren notwendig, um die Menschen vor schädigenden Auswirkungen der Hochwasser zu schützen und um eine bestmögliche, wasserwirtschaftliche Nutzung zu ermöglichen. An wichtigsten Maßnahmen sind zu nennen: Bettfixierungen, Begradigung des Stromes zur Erhöhung der Abflußkapazität, Deiche gegen Überschwemmungen, Arbeiten zum Ausbau und zur Stabilisierung der Schifffahrtsrinnen (Buhnen, Ufer- und Sohlenbefestigungen, Durchstiche, Verbreiterung und Aushub der Fahrrinne) und komplexe Baumaßnahmen wie Staustufen, große Kanäle, Gewässerumlegungen und Stauseen (siehe Abb. 1.1.2).

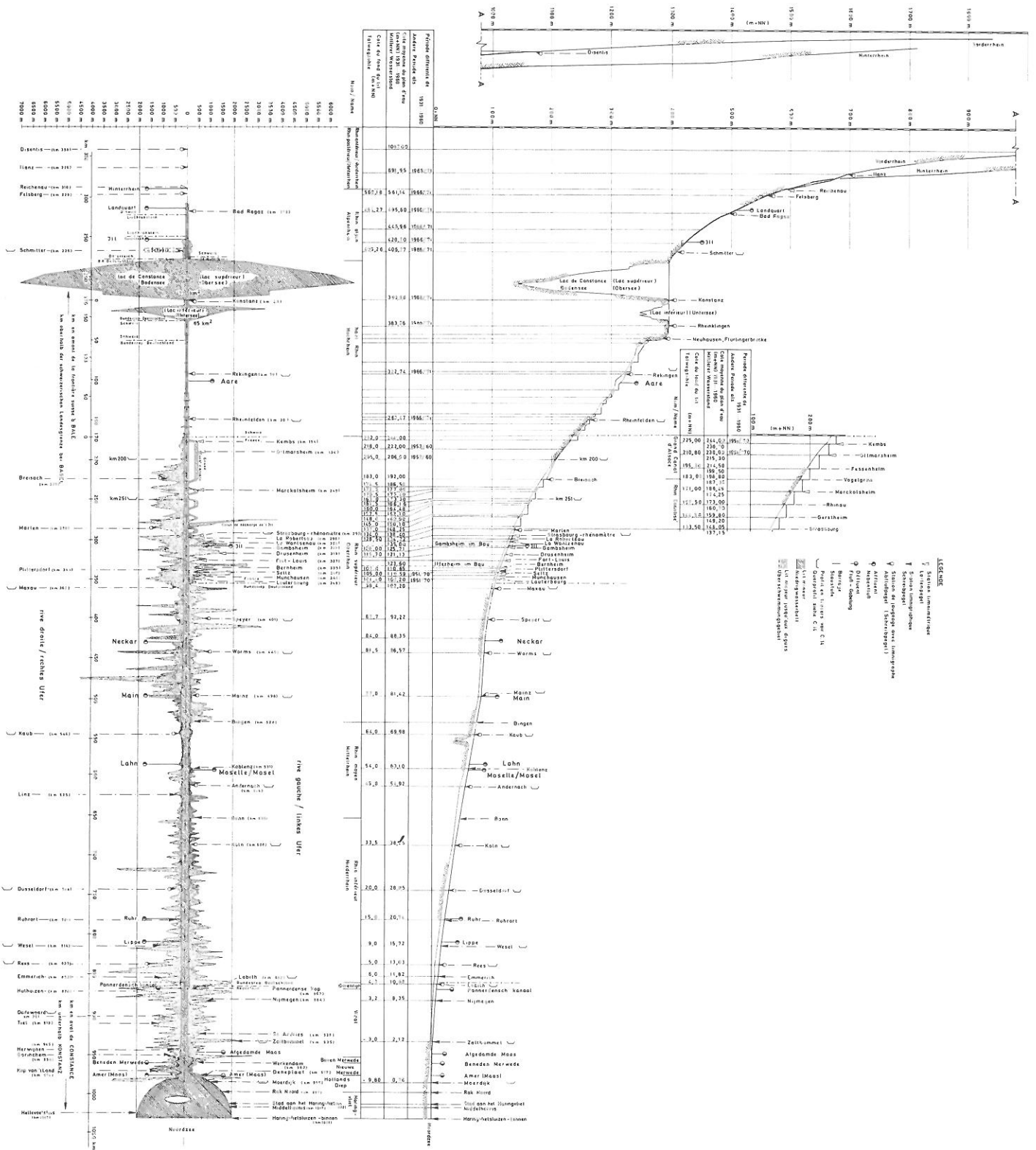


Abb.1.1.2 Längsprofil des Rheins und Lage von Überschwemmungsgebieten [nach KHR 1978]

Das gesamte Rheingebiet ist wegen der hochentwickelten Nutzung durch Handel, Industrie und Bodenbewirtschaftung und einer guten Infrastruktur mit über 50 Millionen Menschen besiedelt. Einige Gebiete sind sehr dicht besiedelt. Es sind diese im schweizerischen Einzugsgebiet die Räume um Basel, Zürich und Bern; auf französischem Territorium sind es die Gebiete um Mülhausen, Straßburg, Nancy und Metz. Im deutschen Teil treten im Oberrheingebiet die Räume um Freiburg, Karlsruhe, Ludwigshafen und Mannheim hervor; im Einzugsgebiet des Neckars ist es der Stuttgarter Raum; im Einzugsgebiet des Mains der Nürnberg-Erlanger Raum, Würzburg und vor allem das untere Maingebiet von Frankfurt bis Wiesbaden; linksrheinisch ist es das Gebiet von Mainz bis Bingen sowie der Bonn-Köln-Düsseldorfer Raum. Im Einzugsgebiet der Mosel verdient das Saarland genannt zu werden. Als reine Stadt- und Industrielandschaft sticht das Ruhrgebiet zwischen Duisburg und Dortmund hervor. Der zu den Niederlanden gehörende Teil des Rheineinzugsgebietes ist sehr dicht besiedelt. Arnheim und Nimwegen im Osten sowie die Hafenstädte Amsterdam und Rotterdam sind besonders hervorzuheben (siehe Abb. 1.1.3).



Abb. 1.1.3 Übersichtskarte der größten Ballungszentren im Rheingebiet

Neben der Land- und Forstwirtschaft, entwickelte sich die gewerbliche Industrie sehr stark. Zu nennen sind der Kohlen- und Erzabbau und die Kali- und Steinsalzwerke. Die seit der Mitte des 19. Jahrhunderts entstandene Chemische Industrie, schuf ihre größten europäischen Werksgruppen bei Basel, bei Ludwigshafen, am Unterlauf des Mains, am Niederrhein und im Mündungsbereich des Rheins. Verarbeitungsindustrien, wie Glasfabriken, Papier- und Zellulosewerke, Textilfabriken, Zuckerfabriken und Brauereien siedelten sich in großer Zahl an. Metallverarbeitung, Maschinenbau und Elektroindustrie entwickelten sich stürmisch. Die meisten dieser Industrien nutzen das Wasser des Rheins zu Kühlzwecken, Wasserversorgung, Energieerzeugung, Vorfluter usw.

Parallel zur industriellen Entwicklung erfolgte der Ausbau des Verkehrs. Das Straßen- und Eisenbahnnetz wurde ausgebaut. Der Rhein wurde zwischen Basel und Nordsee zur Großwasserstraße ausgebaut. Er weist den größten Schiffsverkehr aller europäischen Wasserstraßen auf. Für detailliertere Angaben zur Hydrologie und deren anthropogene Beeinflussung siehe KHR [1978] und KHR [1993].

Alle diese Faktoren führten zu einer starken anthropogenen Beeinflussung der Wasserquantität und Wasserqualität. Die Gewässerqualität wurde dabei im Laufe der Zeit schwerpunktmäßig von unterschiedlichen Stoffgruppen beeinträchtigt (siehe Abb. 1.1.4).

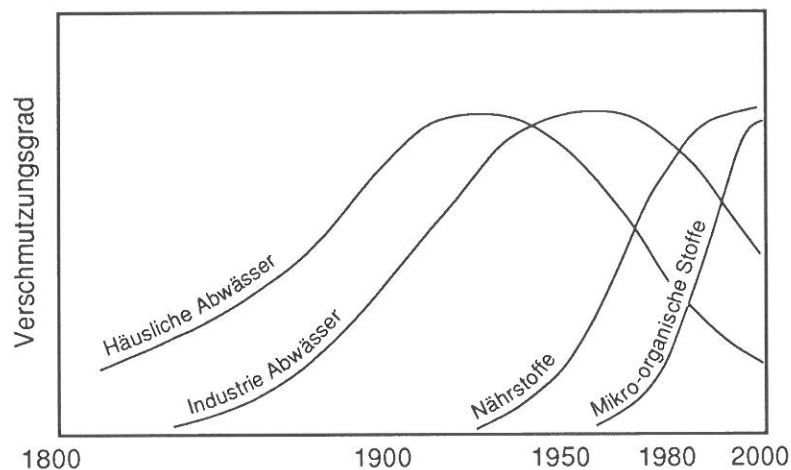


Abb. 1.1.4 Verlauf der Belastung des Rheins durch ausgewählte Stoffgruppen

Neben der kontinuierlichen Belastung des Wassers mit Schadstoffen besteht aber nach wie vor auch ein großes Gefährdungspotential für durch Störfall bedingte Verschmutzung des Rheins, wie die in den Tätigkeitsberichten der IKSR beschriebenen alljährlichen Störfälle beweisen.

Um solche Störfälle möglichst zu verhindern oder mindestens deren Schadenausmaß so gering wie möglich zu halten, wird versucht, durch geeignete Vorsorgemaßnahmen bei den potentiellen Verursachern das Unfallrisiko zu reduzieren. In der Schweiz beispielsweise wird dieses Ziel mithilfe einer präventiv wirkenden Störfallverordnung verfolgt. Da trotzdem Unfälle nicht vollständig ausgeschlossen werden können, betreiben die Anliegerstaaten im Rahmen der Internationalen Kommission zum Schutze des Rheins gegen Verunreinigung ein Alarmsystem im Falle von Gewässerverschmutzungen. Dieses System bezweckt die Information und frühzeitige Warnung der verantwortlichen Stellen der Anliegerstaaten.

Bei einem Brandunfall in der Firma Sandoz in Schweizerhalle gelangten 1986 mit dem Löschwasser größere Mengen von Chemikalien in den Rhein. Die Chemikalien führten zu beträchtlichen Schäden am Ökosystem und zu Beeinträchtigungen der Wassernutzung. Eine Analyse dieses Ereignisses offenbarte die Unzulänglichkeit der damals vorhandenen Mittel für die Vorhersage des Ablaufs einer Verunreinigungswolke im Rhein. Folgedessen haben die zuständigen Minister der Rhein-anliegerstaaten 1988 die Internationale Kommission zum Schutze des Rheins gegen Verunreinigung (IKSR) und die Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR) beauftragt, Methoden und Modelle zu entwickeln, welche die zuverlässige Vorhersage von Fließzeiten und Konzentrationsverläufen von Schadstoffen im Rhein ermöglichen. Als Resultat liegt heute ein sogenanntes Alarmmodell vor.

1.2 Problembeschreibung und Auflagen an das Alarmmodell für den Rhein

Bei einem Störfall im Rhein stellen sich den verantwortlichen Behörden und den wasserwirtschaftlichen Nutzern - beispielsweise den Wasserversorgern entlang des Rheins - neben Problemen der Toxizität vor allem die folgenden Fragen:

- Wann erreicht die Front der Schadstoffwelle einen bestimmten Flußquerschnitt?
- Wie hoch wird voraussichtlich der Spitzenwert der Schadstoffkonzentration sein?
- Wann tritt die Spitzenbelastung auf?
- Wie lange wird ein bestimmter Konzentrationswert überschritten?

Diese Informationen sollten bei jeder Abflußsituation und für jeden Stofftyp beschafft werden können. Die Frage, wann die Schadstoffkonzentration eine Wassernutzung wieder zuläßt, muß nicht vom Alarmmodell vorhergesagt werden, da diese Konzentrationen bei einem Schadenereignis normalerweise von den Nutzern gemessen werden.

Für die Beschaffung und Weitergabe solcher Angaben benötigen die Warnzentralen »real-time« Informationen über qualitative und quantitative Parameter von Meßstationen, sowie Transportmodelle für die Berechnung und Vorhersage des Ablaufs von Schadstoffen im Rhein. Dabei ist davon auszugehen, daß Informationen über eingebrachte Schadstoffmenge, Schadstoffart, zeitliche Verteilung des Schadstoffeintrages, Regelungen der wasserwirtschaftlichen Anlagen und weitere Angaben nur rudimentär zur Verfügung stehen werden.

Als Randbedingungen bei der Entwicklung des Alarmmodelles für die Vorhersage der Stoffausbreitung wurden vorgegeben:

- Das Modell muß operationell bei Störfällen eingesetzt werden können, d.h. die Resultate müssen rasch verfügbar sein.
- Das Modell muß auf Eingabedaten basieren, die real-time beschafft werden können. Dabei handelt es sich um Informationen den Störfall betreffend und um Wasserstände, die mittels Fernübertragung von den Hauptwarnzentralen aus den Meßstationen abgerufen werden können.
- Das Modell soll möglichst einfach konzipiert und auf PCs implementierbar sein, damit es von allen Alarmzentralen problemlos eingesetzt werden kann.

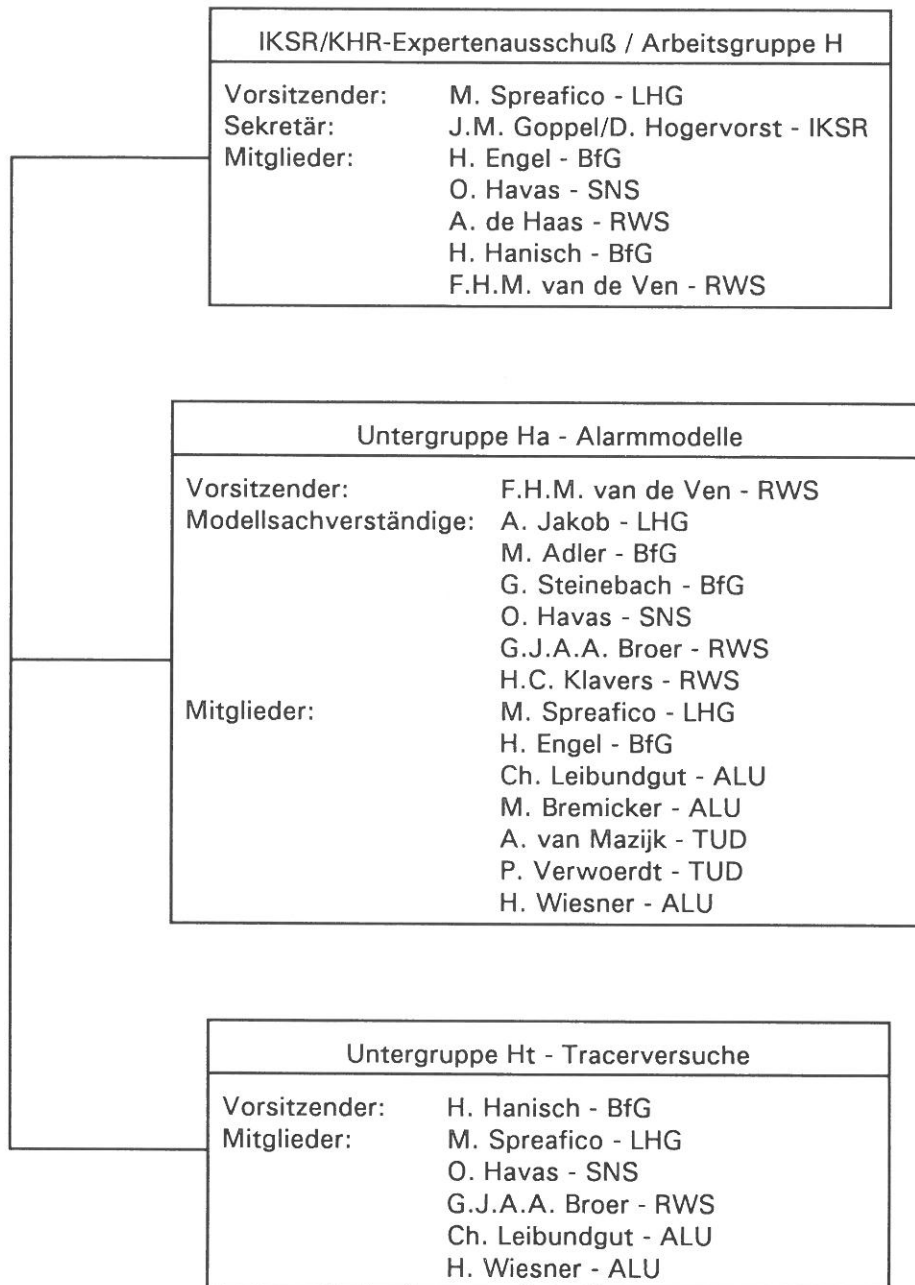
1.3 Organisation und Abwicklung der Arbeiten

Initialisiert und finanziell gefördert wurden die Arbeiten von den Rheinanliegerstaaten, vertreten durch die Arbeitsgruppe K der IKSR und die Koordinatorenkonferenz der KHR.

Ein gemeinsamer Expertenausschuß der IKSR und KHR zeichnete für Planung und Koordination verantwortlich.

Die Detailplanung erfolgte in einer Arbeitsgruppe mit Modellspezialisten und in einer Arbeitsgruppe von Tracereexperten (siehe Abb. 1.3.1).

Ausgeführt wurden die Arbeiten von behördlichen Dienststellen, Universitäten und privaten Institutionen aus der Schweiz, Deutschland, Frankreich und den Niederlanden.



- ALU: Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg i.Br. - Institut für physische Geographie, Lehrstuhl für Hydrologie
- BfG: Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
- IKSR: Internationale Kommission zum Schutze des Rheins gegen Verunreinigung, Koblenz
- LHG: Landeshydrologie und -geologie, beim Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern
- RWS: Rijkswaterstaat, Staatliches Amt für Integralverwaltung der Binnengewässer und für Abwasserreinigung, Lelystad
- SNS: Service de la Navigation de Strasbourg
- TUD: Technische Universität Delft, Fachgruppe für Gesundheitstechnik und Gewässerbewirtschaftung, Fakultät für zivile Technik

Abb. 1.3.1 Zusammensetzung der Expertengruppe IKSR/KHR

Unterstützt wurden die Arbeiten durch die Sekretariate der KHR und IKSR. Die Verwaltung des Modelles wird durch das KHR-Sekretariat sichergestellt.

Die Landeshydrologie und -geologie beim schweizerischen Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, die Bundesanstalt für Gewässerkunde in Koblenz und Rijkswaterstaat in den Niederlanden,

unterstützen durch sogenannte Modellsachverständige die Hauptwarnzentralen bei allfällig auftretenden Problemen beim Einsatz des Alarmmodelles. Diese Institutionen verfügen über vertiefte Kenntnisse bezüglich Modellaufbau.

Operationell eingesetzt wird das Alarmmodell durch die Hauptwarnzentralen.

Die durchgeführten Arbeiten sind wie folgt zusammenzufassen:

- Ein 1-dimensionales Alarmmodell wurde entwickelt und in den Hauptwarnzentralen installiert (siehe Abschnitt 1.4 und Kapitel 2). Eine Filmversion ermöglicht die anschauliche Darstellung des Transportvorganges.
- Für die Berechnung der Fließgeschwindigkeiten im Rhein wurden Untersuchungen durchgeführt (siehe Kapitel 3).
- Die Kalibrierung und Verifikation des Alarmmodelles erfolgte mittels großräumiger Tracerversuche (siehe Kapitel 4).
- Daneben wurden auch Sensitivitätsanalysen und Untersuchungen mit 2-dimensionalen Stofftransportmodellen ausgeführt [Mazijk 1989, VAW 1990].
- Die Mitarbeiter der Hauptwarnzentralen wurden anlässlich zweier Workshops in der Handhabung des Alarmmodelles ausgebildet.

1.4 Das Alarmmodell für die Vorhersage der Stoffausbreitung im Rhein

Ausgehend von den vorgegebenen Randbedingungen und der Erkenntnis, daß während Störfällen die quantitativen Informationen über das Schadenereignis sehr unsicher sind, wurde in einer ersten Entwicklungsphase die natürlichen Vorgänge stark vereinfacht modelliert. So wurde angenommen, daß nur longitudinale Dispersion auftritt, eine komplette Durchmischung des Schadstoffes unmittelbar nach der Eingabe und unterhalb von Seitenzuflüssen auftritt, stationäre Fließbedingungen herrschen und wenn schon, nur ein linearer Abbau des Schadstoffes stattfindet. Die erste Variante des Alarmmodelles basierte deshalb auf einer eindimensionalen Advektions-Diffusions-Gleichung (Taylor-Gleichung), welche den Stofftransport in Flüssen aufgrund der Strömung und der longitudinalen Dispersion beschreibt. Die Fließzeiten des Wassers werden dabei in diesem Modell nicht implizit berechnet, sondern sind in Funktion des Wasserstandes resp. des Abflusses fest eingegeben. Die Regulierungspläne einzelner wichtiger Flußkraftwerke im Oberrhein sind ebenfalls im Modell eingebaut [siehe Fischer 1979, Griffioen 1989].

Die Überprüfung dieser ersten Modellvariante zeigte, daß erwartungsgemäß die Fließzeiten der Schadstoffwolke gut vorhergesagt werden können, die Spitzenkonzentrationen des Schadstoffes hingegen nur in Einzelfällen befriedigend zu berechnen sind und der zeitliche Verlauf der Schadstoffkonzentrationen nicht mit dem beobachteten Verlauf übereinstimmt. In der Natur beobachtet man oft schiefe Verteilungen der Schadstoffkonzentrationen, was mit dem eindimensionalen Modell nicht zu reproduzieren ist. Aus diesem Grund wurde die erste Variante des Alarmmodelles zu einem »quasi zweidimensionalen Modell« ausgebaut, indem man den Einfluß der stagnanten Zonen zusätzlich in das ursprüngliche Modell einbaute [KHR 1991]. Eine analytische Lösung der Advektions-Diffusions-Gleichung mit Einbezug der stagnanten Zonen-Modellierung existiert nicht, weshalb man auf eine von Chatwin [1980] vorgeschlagene Approximation zurückgriff. Diese Approximation führt zur folgenden Gleichung:

$$\phi_E(x, t) = \frac{M/Q}{\sqrt{(4\pi D_0 t/c^2)}} \cdot \exp \left[\frac{-(t - x/c)^2}{4D_0 t/c^2} \right] \cdot \left[1 + \frac{G_1}{6} \cdot H_3 \left[\frac{t - x/c}{\sqrt{(2D_0 t/c^2)}} \right] \right] \quad (1.4.1)$$

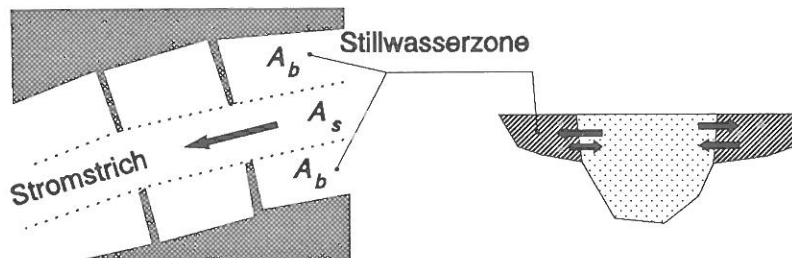
mit: ϕ_E	: Stoffkonzentration	(kg/m ³)
x	: Koordinaten in Längsrichtung des Flusses	(m)
t	: Zeit	(s)
M	: Schadstoffmenge	(kg)
Q	: Abflußmenge	(m ³ /s)
D_0	: Longitudinaler Dispersionskoeffizient	(m ² /s)
c	: Stofftransportgeschwindigkeit	(m/s)

$$c = \frac{u_s}{1 + \beta}$$

mit: u_s	: Mittlere Fließgeschwindigkeit im abflußwirksamen Teil des Flußquerschnittes	(m/s)
β	: Quotient aus Stillwasserzonenfläche A_b und Durchflußfläche A_s (siehe Abb. 1.4.1)	(-)
H_3	: 3. Hermitesches Polynom ($H_3(z) = z^3 - 3 \cdot z$)	(-)
G_t	: Schiefeparameter	(-)

Der Dispersionskoeffizient wird dabei wie folgt erhalten:

$$D_0 = \alpha \cdot \frac{u_s^2 \cdot B_s^2}{a \cdot u_*} \quad (1.4.2)$$



(a) Grundriß einer Flußstrecke mit Bühnenfeldern

(b) Flußquerschnitt

Abb. 1.4.1 Zum Stillwasserzonenparameter $\beta = A_b / A_s$

α	: Parameter	(-)
B_s	: Breite des Stromstriches (abflußwirksamer Teil)	(m)
a	: Mittlere Wassertiefe	(m)
u_*	: Schubspannungsgeschwindigkeit	(m/s)

$$u_* = (u_s \cdot \sqrt{g}) / C$$

wobei der Chezy-Koeffizient im Modell wie folgt berechnet wird:

$$C = 25 \cdot (a/k_n)^{1/6}$$

mit k_n = Konstante von Nikuradse = 0,2 m gilt

$$C = 25 \cdot (a/0,2)^{1/6}$$

g = Gravitationskonstante (9,81 m/s²)

Die Eingabe der für die Berechnung notwendigen Eingabedaten erfolgt anhand von Bildschirmmasken. Mit Hilfe einer ersten Maske können allgemeine Daten zum Störfall und des Vorhersagequerschnittes eingegeben werden (siehe Abb. 1.4.2). Man hat die Wahl einen Wert für den Dispersionskoeffizienten einzugeben oder den Koeffizienten durch das Programm rechnen zu lassen.

Neben gelösten Stoffen hat man auch die Möglichkeit, die Fließzeiten von Schwimmstoffen abzuschätzen, welche auf der Annahme eines Transportes im Stromstrich an der Oberfläche beruhen und somit nicht für alle Schwimmstoffe gelten.

08-23-1993 | IKSR/KHR Alarmmodell Rhein V2.1 | 08:19:54

< 1> Titel	= Einspeisung 1234	
< 2> Einleitungszweig	= Rhein	Einleit. km = 171
< 3> Einleitungsart	= Tabelle	Anzahl Paare = 24
< 4> Dispersionskoeffizient	= Default	
< 5> Halbwertszeit (T)	= Kein Abbau	
< 6> Schwimmstoff	= Nein	
< 7> Beobachtungsgebiet	= Rheingebiet	
< 8> Beobachtungszweig	= Rhein	Beobacht. km = 800
< 9> Datum des Unfalls	= 8811-2712	

Abb. 1.4.2 Übersicht über die Eingabegrößen der Eingabemaske 1

Als Einleitungsart kann ein Momentan- oder ein Rechteckimpuls eingegeben werden. Ist die Konzentrationsverteilung des Schadstoffes bekannt, muß dieselbe in Tabellenform eingetippt werden. Hierzu dient eine zweite Maske, welche diese Tabelleneingabe ermöglicht. Allenfalls vorhandene Grundkonzentrationen sind dabei vorgängig abzuziehen.

Die dritte Maske ermöglicht die Eingabe der hydrologischen Daten (Wasserstände und Stauregelungen im niederländischen Teil des Rheins). Der Abfluß wird mithilfe der ins Modell eingebauten Wasserstands-Abflußbeziehungen aus den real-time abgefragten Wasserstandsbeobachtungen berechnet.

Als Resultat erhält man eine tabellarische und eine graphische Darstellung des Schadstoffdurchganges im gewünschten Kontrollquerschnitt (siehe Abb. 1.4.3). Gleichzeitig können für wichtige Punkte entlang des Rheins die zu erwartenden maximalen Schadstoffkonzentrationen dargestellt werden.

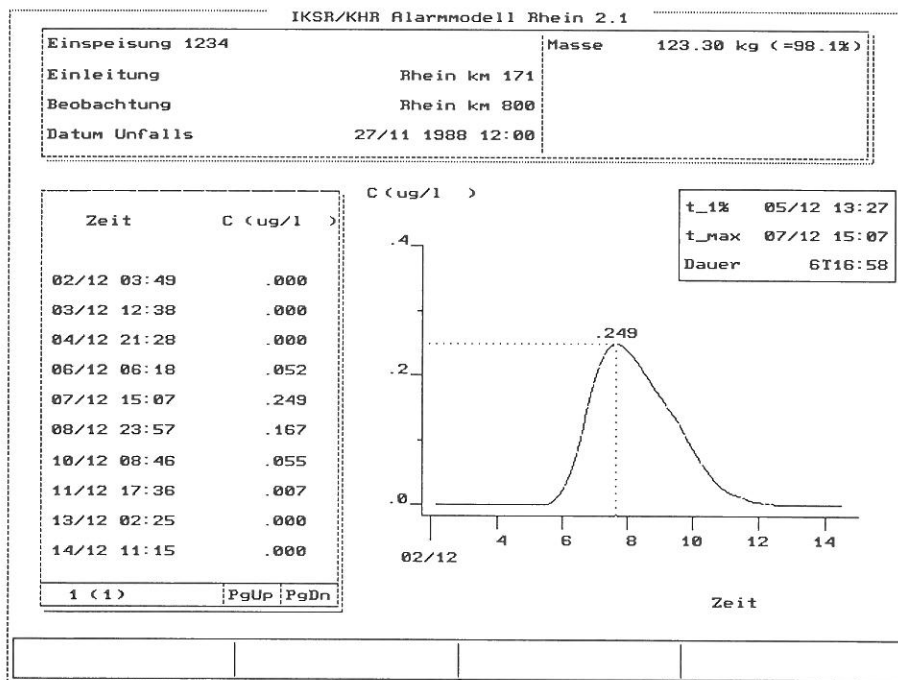


Abb. 1.4.3 Zu erwartende Schadstoffkonzentrationen im Vorhersagequerschnitt

Für das Modell mußten mittlere Fließzeiten des Wassers bereitgestellt werden. Für den schweizerischen Rheinabschnitt von Stein am Rhein bis Basel und für die Aare vom Bielersee bis zur Mündung in den Rhein wurden durch die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie die mittleren Fließzeiten mithilfe des Computerprogrammes FLORIS berechnet. Dieses Programm

simuliert instationäre (und als Spezialfall auch stationäre) Abflüsse in offenen Gerinnen. Dabei werden die Kontinuitäts- und die Impulsgleichung von de Saint-Venant mit einem Differenzenverfahren gelöst [LHG 1991]. Abb. 1.4.4 zeigt ein Diagramm von so berechneten Fließzeiten. Für die Fließzeitberechnungen zwischen Basel und Lobith sowie für die Mosel basiert die Berechnung auf Wasserspiegellagenberechnungen und unterhalb Lobith wurde das hydrodynamische Modell ZWENDL verwendet.

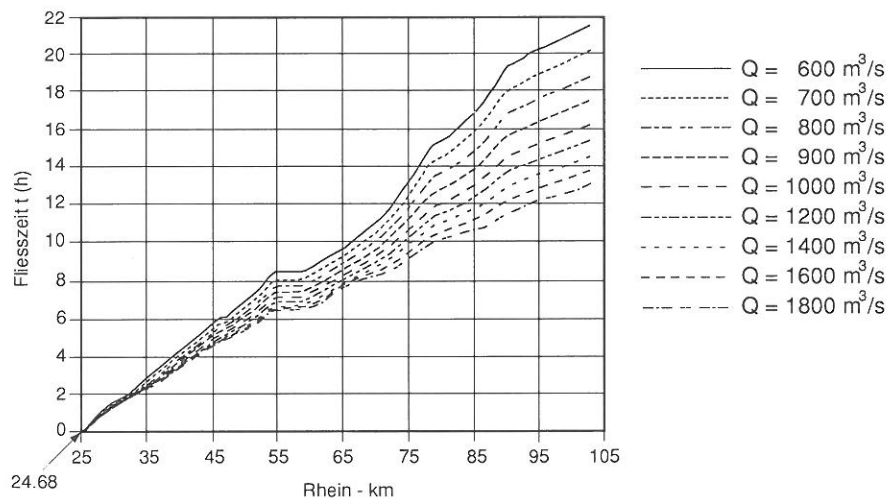


Abb. 1.4.4 Fließzeiten im Rhein von Stein am Rhein km 24,680 bis zur Aaremündung km 103,000

Die Kalibrierung und die Verifikation des Alarmmodelles erfolgte anhand von Tracerversuchen [KHR 1991] in der Schweiz, Frankreich, Deutschland und den Niederlanden. In der Schweiz beispielsweise wurden zwei große Markierversuche im Rhein, einer von Albrück bis Basel und einer von Rheinau bis Basel realisiert. Die Bestimmung der Laufzeit der Tracerwolke stand im Vordergrund der Untersuchungen. Doch wurden auch die Stoffausbreitung in Stauräumen und die Einmischung der Aare in den Rhein untersucht. Ferner dienen die experimentell bestimmten Resultate der Markierversuche auch zu Vergleichszwecken zwischen Transportzeiten von gelösten Stoffen und mittleren Fließzeiten des Wassers, wie sie mit dem FLORIS-Modell bestimmt worden sind. Der Vergleich zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen den mit den beiden Methoden ermittelten Fließzeiten. Abb. 1.4.5 zeigt die transversale Verteilung des Markierstoffes in einem Querschnitt 15 km unterhalb der Eingabestelle in Albrück. Der Tracer erschien zuerst im Stromstrich. Eine Viertelstunde später konnte im ganzen Querschnitt mit Ausnahme der Uferzonen der Tracer gemessen werden. Um 12.50 floß die maximale Konzentration des Markierstoffes vorbei, wobei die höchste Konzentration im Stromstrich auftrat. Nachher nahm die Konzentration im Stromstrich kontinuierlich ab und um 14.00 Uhr war die Konzentration im Stromstrich 5mal kleiner als in den Uferzonen.

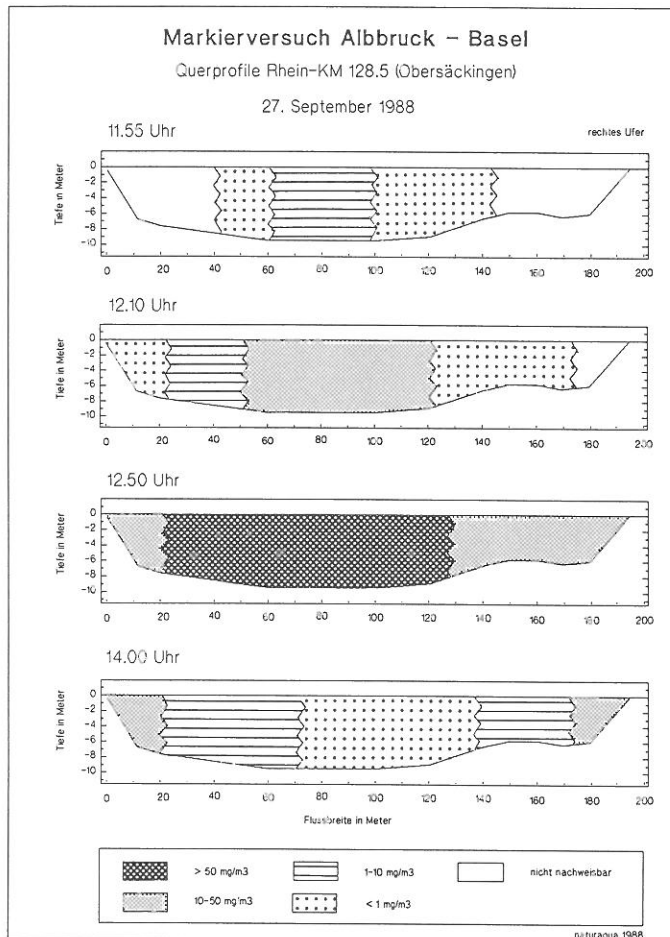


Abb. 1.4.5 Tracerverteilung im Querprofil Obersäckingen km 128,500

1.5 Wertung des Alarmmodelles

Aufgrund der bis heute gemachten Erfahrungen in den Hauptwarnzentralen stellt das Alarmmodell ein nützliches Hilfsmittel für die zielgerichtete Alarmierung bei einem Störfall im Rhein dar. Durch die getroffenen Vereinfachungen ist das Modell jedoch nicht in der Lage, alle Prozesse der Schadstoffausbreitung genau wiederzugeben. Die dadurch verursachten Fehler in der Vorhersage sind aber klein im Vergleich zu Fehlern, welche durch die ungenaue Bestimmung von Eingabedaten eingeführt werden können. Beispielsweise ist die eingeleitete Schadstoffmenge bei einem Unfall oft nur sehr ungenau abzuschätzen. Deshalb wird vorläufig auf eine weitere Verbesserung des Alarmmodelles verzichtet und vorrangig versucht, die Datenlage bei den Inputgrößen zu verbessern. So wird gegenwärtig in Basel eine Überwachungsstation für die Gewässerqualität aufgebaut, welche in der Lage ist, Konzentrationen von Schadstoffen im Rhein relativ kurzfristig zu bestimmen.

Wie dargestellt, wird das Alarmmodell in seiner gegenwärtigen Form als operationell angesehen und es ist vorläufig keine neue Version vorgesehen. Falls bei der Anwendung noch Mängel auftreten sollten, werden diese selbstverständlich noch behoben.

Es laufen aber zusätzliche Untersuchungen auf regionaler, nationaler und bilateraler Ebene, welche in engem Zusammenhang mit dem Alarmmodell stehen und in einer späteren Phase zu einer Verbesserung resp. Erweiterung des Modells führen können. An solchen Untersuchungen sind zu nennen:

- Tracerversuche in der Aare und in der Mosel.

Die Flußstrecken der Nebenflüsse Aare und Mosel sind strukturell bereits heute im Alarmmodell eingebaut. Die Kalibrierung und Verifikation muß aber noch anhand der Resultate von Tracerversuchen erfolgen.

- Entwicklung eines 2-dimensionalen Stofftransportmodelles.
Gegenwärtig laufen in der Schweiz Entwicklungsarbeiten an einem 2-dimensionalen Stofftransportmodell, das eine detailliertere Berechnung des Schadstofftransportes bei komplexen Abflußbedingungen erlaubt. Dieses Modell ermöglicht die Simulation der Schadstoffausbreitung auch im Nahbereich einer Einleitung oder im Bereich von Seitenzuflüssen. Durch die Aufteilung des abflußwirksamen Flußquerschnittes in nebeneinander liegende Stromröhre wird die Vorhersage des Transportes von Stoffen sowohl in der Flußmitte als im Uferbereich möglich. Der Einbau von neuen Stoffabbauroutinen sollte es erlauben, die Konzentrationsverteilung des Schadstoffes genauer zu beschreiben. Das 2-dimensionale Modell soll nicht das Alarmmodell ersetzen, jedoch Problemkreise lösen helfen, welche durch das 1-dimensionale Alarmmodell nicht oder nur unvollständig lösbar sind [VAW 1990].
- Modell für die stauregulierten Flußabschnitte in den Niederlanden.
Für den niederländischen Rheinabschnitt zwischen Lobith und Hagestein wird ein Detailmodell für die genaue Berechnung der Fließzeiten bei Niederwasserabfluß entwickelt.
- Detaillierte Modellierung der Einflüsse von Stillwasserzonen auf den Stofftransport.
Als Forschungsarbeit werden die Transportphänomene zwischen den Stillwasserzonen und dem Stromstrich wissenschaftlich untersucht, um die Auswirkungen von Einzelzonen und einer Folge von Zonen auf den Stofftransport besser beschreiben zu können.

Das KHR-Sekretariat koordiniert in Zukunft den Unterhalt und das updating der variablen Größen im Alarmmodell (beispielsweise die Anpassung der eingebauten Pegelstand-Abfluß-Schlüsselkurven der Basisstationen). Die hierzu notwendigen finanziellen Mittel werden durch den Verkauf resp. die Leasing-Gebühren des Modelles beschafft.

Bleibt zu vermerken, daß die Zusammenarbeit der beteiligten Institutionen aus vier Ländern erfreulich kooperativ verlaufen ist und sich befruchtend auf die einschlägigen Tätigkeiten der einzelnen Länder ausgewirkt hat. Die Zusammenarbeit zweier Flußgebietskommissionen hat sich bewährt und sollte als wegweisend für die Bewältigung gemeinsamer Probleme angesehen werden.

1. OVERZICHT

M. Spreafico

Landeshydrologie und -geologie, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, CH-3003 Bern

1.1 Uitgangspunt

Met een stroomgebiedsooppervlak van 180 000 km² behoort de Rijn tot de waterrijkste en belangrijkste rivieren van Europa en als scheepvaartweg tot de verkeersrijkste ter wereld.

De 1320 km lange Rijn kan worden onderverdeeld in zes grote deeltrajecten: het gedeelte vanaf de samenvloeiing van de twee belangrijkste bronrivieren Vorderrhein en Hinterrhein tot de monding in het Meer van Konstanz wordt Alpenrhein genoemd. Tussen het Meer van Konstanz en Bazel draagt de rivier de naam Hochrhein, tot Bingen Oberrhein en vervolgens tot Keulen Mittelhrein. Van Keulen tot Lobith wordt hij Niederrhein genoemd waarna hij een aantal kilometers verder overgaat in de Rijndelta.

De grootste zijrivieren zijn: Aare, Ill, Neckar, Main, Lahn, Moezel, Roer en Lippe (fig. 1.1.1).



Fig. 1.1.1 Stroomgebieden van de Rijn en zijn belangrijkste zijrivieren

1. OUTLINE

M. Spreafico

Landeshydrologie und -geologie, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, CH-3003 Bern

1.1 Starting point

With a catchment area of 180 000 km² the River Rhine ranks high among the European rivers that are most important and transport most water. As a shipping route it is one of the busiest in the world.

The course of the River Rhine, with a length of 1320 km, can be divided into 6 major parts: the stretch from the confluence of the main source brooks, Vorderrhein and Hinterrhein, to the point where the river discharges into Lake Constance is called Alpine Rhine. Between Lake Constance and Basel it is called High Rhine, downstream to Bingen its name is Upper Rhine and the next stretch to Cologne is named Mid-Rhine. From Cologne to Lobith it is called Lower Rhine and a few kilometres downstream the Rhine delta begins.

The main tributaries of the Rhine are: Aare, Ill, Neckar, Main, Lahn, Moselle, Ruhr and Lippe (fig. 1.1.1).

Fig. 1.1.1 Catchment areas of the River Rhine and its most important tributaries

Vanwege het intensieve gebruik door handel, industrie en landbouw en een goede infrastructuur is het Rijngebied bevolkt met meer dan 50 miljoen mensen. Enkele gebieden zijn zeer dicht bevolkt. In het Zwitserse deel van het stroomgebied gaat het daarbij om de gebieden rondom Basel, Zürich en Bern; op Frans grondgebied de gebieden in de omgeving van Mulhouse, Straatsburg, Nancy en Metz. In Duitsland onderscheiden zich in het stroomgebied van de Oberrhein de gebieden rondom Freiburg, Karlsruhe, Ludwigshafen en Mannheim; in het stroomgebied van de Neckar de omgeving van Stuttgart; in het stroomgebied van de Main de omgeving van Neurenberg-Erlangen, Würzburg en met name het benedenstroomse Maingebied van Frankfurt tot Wiesbaden; op de linker Rijnsoever gaat het om het gebied van Mainz tot Bingen alsmede de omgeving van de steden Bonn, Keulen en Düsseldorf. In het stroomgebied van de Moezel kan het Saarland worden genoemd. Het Roergebied tussen Duisburg en Dortmund spant de kroon als een puur stedelijk en industrieel landschap. Het Nederlandse deel van het Rijnstroomgebied is zeer dicht bevolkt. Arnhem en Nijmegen in het oosten alsmede de havensteden Amsterdam en Rotterdam onderscheiden zich het meest in dit opzicht (zie fig. 1.1.3).

As the Rhine basin is very intensely used by commerce, industry and agriculture and because of its good infrastructure, its total population amounts to more than 50 million people. Some areas are very densely populated. In the Swiss part of the basin they are the regions of Basel, Zurich and Bern; in the French territory the areas round Mulhouse, Strasbourg, Nancy and Metz. In Germany in the Upper Rhine basin the regions of Freiburg, Karlsruhe, Ludwigshafen and Mannheim stand out; in the Neckar basin the area round Stuttgart should be mentioned; in the Main basin the region of Nuremberg-Erlangen, Würzburg and particularly the lower Main basin from Frankfurt to Wiesbaden; on the left bank the area between Mainz and Bingen, as well as the Bonn-Cologne-Düsseldorf region may be distinguished. In the Moselle basin Saarland should be mentioned. The Ruhr area between Duisburg and Dortmund stands out as a purely urban and industrial region. The part of the Rhine basin in the Netherlands is very densely populated. Especially Arnhem and Nijmegen in the east, as well as the ports of Amsterdam and Rotterdam should be mentioned in this respect (see fig. 1.1.3).



Fig. 1.1.3 Gebieden met de hoogste bevolkingsdichtheden in het Rijnstroomgebied

Fig. 1.1.3 Areas with the highest population density in the Rhine basin

Naast de land- en bosbouw, ontwikkelden ook de handel en industrie zich in sterke mate. Daarbij kan worden gedacht aan kool- en ertsontginning en de kali- en steenzoutmijnen. Vanaf het midden van de 19e eeuw ontstond de chemische industrie, waarbij de grootste Europese fabriekskoncentraties in de buurt van Bazel en Ludwigshafen, aan de benedenloop van de Main, aan de Niederrhein en in het Rijnmondgebied verrezen. Verwerkende industrieën, zoals glasfabrieken, papier- en cellulosefabrieken, textielfabrieken, suikerfabrieken en brouwerijen vestigden zich in groten getale. Metaalverwerkende industrieën, machinebouw en elektronische industrieën ontwikkelden zich explosief. De meeste van deze industrieën gebruikten het Rijnwater als koel- en proceswater, voor energieopwekking, als bestemming voor het afvalwater etc.

Evenwijdig aan de industriële ontwikkeling vond ook een toename plaats van het verkeer. Het wegen- en spoorwegennet werd uitgebreid. De Rijn werd tussen Bazel en de Noordzee uitgebouwd tot vaarweg voor grote schepen. Het scheepvaartverkeer op de Rijn is het meest intensieve van alle Europese waterwegen. Voor gedetailleerde informatie met betrekking tot de hydrologie en hoe zij door de mens is beïnvloed, zie CHR [1978] en CHR [1993].

Al deze factoren leidden tot een sterke antropogene beïnvloeding van zowel waterkwantiteit als waterkwaliteit. Het zwaartepunt van de belasting van de waterkwaliteit lag in de loop der jaren afwisselend bij verschillende stofgroepen (zie fig. 1.1.4).

Besides agriculture and forestry, trade and industry developed strongly as well. Examples are coal and ore mining and the potassium and rock salt industries. The chemical industry, which developed since the middle of the 19th century, created its largest European industrial clusters near Basel and Ludwigshafen, on the lower course of the Main, on the Lower Rhine and in the area where the Rhine discharges into the sea. Processing industries such as glassworks, paper and cellulose factories, textile factories, sugar refineries and breweries settled in large numbers. The metallurgical industry, engineering works and the electrical industry were booming. Most of these industries use Rhine water for cooling purposes, process water supply, energy production, drainage etc.

Parallel to the industrial development the expansion of traffic took place. The network of roads and railways was extended. Between Basel and the North Sea the Rhine was transformed into a major waterway, with the most intensive navigation of all European waterways. More detailed information on the hydrology of the Rhine and how it has been influenced by man can be found in CHR [1978] and CHR [1993].

Due to all these factors human influence on water quantity and water quality has become considerable. The main causes of the impairment of the water quality have been different groups of substances which succeeded each other in the course of time (see fig. 1.1.4).

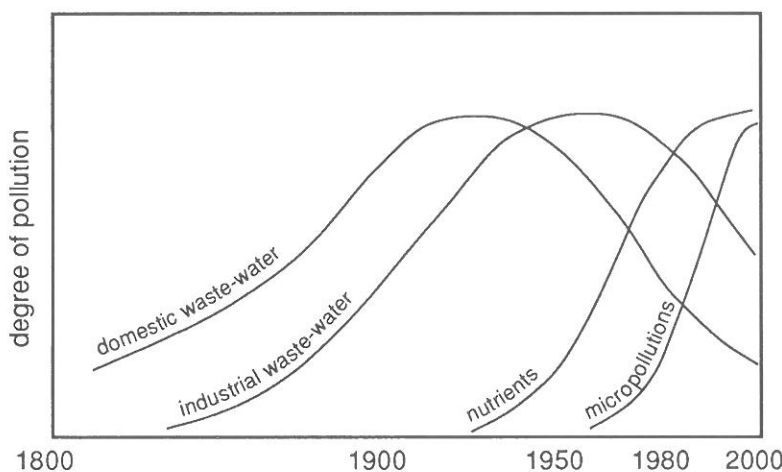


Fig. 1.1.4 Verloop van de belasting van de Rijn door geselecteerde stofgroepen

Fig. 1.1.4 Load of the Rhine by selected substance groups in the course of time

Naast de continue belasting van het water met verontreinigende stoffen bestaat echter ook nog steeds een groot potentieel gevaar voor verontreiniging van de Rijn door zogenaamde calamiteiten, hetgeen wordt bevestigd door de statistieken van ongevallen die ieder jaar weer in de verslagen van de IRC staan.

Ten einde zulke calamiteiten zo mogelijk te verhinderen of tenminste de schadelijke gevolgen ervan zoveel mogelijk te beperken, wordt getracht het lozingsrisico te reduceren door middel van gerichte voorzorgsmaatregelen bij de potentiële veroorzakers. In Zwitserland tracht men dit bijvoorbeeld te bereiken door middel van een preventief werkende lozingsverordening. Aangezien desondanks calamiteiten niet volledig kunnen worden uitgesloten, hebben de Rijnsoeverstaten, in het kader van de internationale Commissie ter bescherming van de Rijn tegen verontreiniging, een alarmsysteem voor waterveroontreinigingen opgezet. Dit systeem heeft tot doel de verantwoordelijke instanties in de Rijnsoeverstaten in een vroeg stadium te informeren en te waarschuwen.

Bij een brand bij de firma Sandoz in Schweizerhalle kwamen in 1986 grote hoeveelheden met chemicaliën verontreinigd bluswater in de Rijn terecht. De chemicaliën brachten aanzienlijke schade toe aan het ecosysteem en leidden tot beperkingen van het watergebruik. Uit een analyse van dit voorval bleek de ontoereikendheid van de destijds beschikbare middelen voor de voorspelling van het verloop van een verontreinigingsgolf in de Rijn. Dientengevolge hebben de verantwoordelijke ministers van de Rijnsoeverstaten in 1988 de internationale Commissie ter bescherming van de Rijn tegen verontreiniging (IRC) en de internationale Commissie voor de Hydrologie van het Rijngebied (CHR) opgedragen methoden en modellen te ontwikkelen, voor een betrouwbare voorspelling van stroomtijden en concentratieverlopen van verontreinigingen in de Rijn. Als resultaat kan thans worden beschikt over een zogenaamd alarmmodel.

1.2 Probleembeschrijving en aan het Rijnalarmmodel gestelde eisen

Tijdens een calamiteit op de Rijn hebben de verantwoordelijke instanties en de waterhuishoudkundige gebruikers - bijvoorbeeld de watervoorzieningsbedrijven langs de Rijn - niet alleen behoefte aan informatie over de toxiciteit, maar met name aan een antwoord op de volgende vragen:

In addition to the continuous load of the water by harmful substances, however, there is still the important potential danger that the River Rhine is polluted by accidents due to malfunction, as is proven by the annual reports of the IRC which describe the yearly cases of accidental spills.

In order to prevent such accidents as much as possible or at least reduce to a minimum the damage caused, attempts are made to limit the risk of accidents by means of appropriate precautions taken by the potential polluter. In Switzerland, for example, a preventive regulation on accidents is deployed to reach this aim. As accidents still cannot be precluded completely, the Rhine riparian countries, within the framework of the International Rhine Commission, have set up an alarm system to be used in cases of water pollution. It is an information and early warning system for the authorities responsible in the riparian states.

In 1986 during a fire at the Sandoz plant in Schweizerhalle (Switzerland), large quantities of chemicals were washed into the River Rhine with the extinguishing water. The chemicals caused considerable damage to the ecosystem and led to limitation of the water use. An analysis of this incident proved the inadequacy of the means which were then available for predicting the transport of a pollution cloud in the River Rhine. Consequently the ministers of the Rhine riparian states concerned took the decision in 1988 to charge the International Rhine Commission (IRC) and the international Commission for the Hydrology of the Rhine basin (CHR) with the assignment to develop methods and models which would enable reliable forecasting of the travel time and concentration distribution of contaminants in the Rhine. As a result a so-called alarm model is now available.

1.2 Problem definition and requirements for the Rhine alarm model

If an accident occurs in the Rhine the authorities responsible and the users of the water - for example the water suppliers along the river - are not only faced with problems concerning toxicity, but also with the following questions:

- Wanneer bereikt het front van de verontreinigingsgolf een bepaalde dwarsdoorsnede van de rivier?
- Wat zal de vermoedelijk hoogste waarde van de verontreinigingsconcentratie zijn?
- Wanneer treedt de maximale belasting op?
- Hoe lang wordt een bepaalde concentratie overschreden?

Deze informatie zou voor iedere afvoersituatie en voor iedere stof geleverd moeten kunnen worden. De vraag, wanneer op grond van de verontreinigingsconcentratie het gebruik van water weer kan worden toegestaan, behoeft niet door het alarmmodel te worden beantwoord, aangezien deze concentratie bij een calamiteit normaal gesproken door de belanghebbenden wordt gemeten.

Voor het verkrijgen en doorgeven van dergelijke informatie moeten de alarmcentrales kunnen beschikken over „real-time” informatie over kwalitatieve en kwantitatieve parameters van meetstations, alsmede over transportmodellen voor de berekening en voorspelling van het verloop van verontreinigingen in de Rijn. Daarbij dient men ervan uit te gaan dat slechts rudimentaire informatie beschikbaar zal zijn over de hoeveelheid en het soort geloosde verontreiniging, het chronologische verloop van de lozing, stuwmanipulaties en verdere gegevens.

Bij de ontwikkeling van het alarmmodel voor de voorspelling van stofverspreiding is van de volgende randvoorwaarden uitgegaan:

- Het model dient in het geval van calamiteiten operationeel te kunnen worden ingezet, d.w.z. de resultaten moeten snel beschikbaar zijn.
- Het model moet uitgaan van invoergegevens die „real-time” verkregen kunnen worden. Het gaat daarbij om informatie betreffende de calamiteit en om waterstandsgegevens die door de hoofdalarmcentrales door middel van datatransmissie bij de meetstations kunnen worden opgevraagd.
- Het model moet zo eenvoudig mogelijk van opzet zijn en op een PC kunnen worden geïmplementeerd, zodat het door alle alarmcentrales probleemloos kan worden gebruikt.

- When will the front of the pollution wave arrive at a certain cross section of the river?
- How high will the peak value of the pollutant concentration probably be?
- When will the peak load be reached?
- How long will a certain concentration value be exceeded?

It should be possible to provide these informations for every discharge condition and for each type of substance. It is not necessary for the alarm model to be able to predict at what time the pollutant concentration allows a renewed use of the water, because during a pollution incident these concentrations are normally measured by the interested parties.

To provide and transmit the necessary information, the warning centres need real-time data on qualitative and quantitative parameters from measuring stations, as well as transport models for the calculation and prediction of the course of contaminants in the River Rhine. Besides it should be assumed that only rudimentary information will be available concerning the quantity of pollutant spilled, type of pollutant, temporal distribution of the introduction of the substance, regulating manoeuvres of water management installations and further details.

The alarm model for predicting substance propagation which was to be developed, had to fulfil the following prerequisites:

- The model should be ready to be used operationally in cases of accidental pollution, i.e. the results must be available promptly.
- The model must be based on input data that can be provided real-time. These data are information concerning the accident and water level data, which the warning centres can obtain from the measuring stations by telemetering transmission.
- The model design should be as simple as possible and it should be suitable to be implemented on PC's, so that it can be used without difficulty by all alarm centres.

1.3 Organisatie en uitvoering van de werkzaamheden

De werkzaamheden zijn geïnitieerd en gefinancierd door de Rijnsoeverstaten, vertegenwoordigd door de IRC-werkgroep K en het coördinatorenoverleg van de CHR.

Een gemeenschappelijk comité van deskundigen van IRC en CHR was verantwoordelijk voor planning en coördinatie.

De gedetailleerde planning van de werkzaamheden vond plaats in een werkgroep van modelspecialisten en een werkgroep van tracerdeskundigen (zie fig. 1.3.1).

De werkzaamheden werden uitgevoerd door overheidsinstellingen, universiteiten en particuliere instituten uit Zwitserland, Duitsland, Frankrijk en Nederland.

De werkzaamheden werden ondersteund door de secretariaten van CHR en IRC. Het secretariaat van de CHR is verantwoordelijk voor het beheer van het model.

Bij eventuele problemen tijdens het gebruik van het alarmmodel worden de hoofdalarmcentrales ondersteund door zogenaamde modeldeskundigen die beschikbaar worden gesteld door de „Landeshydrologie und -geologie”, onderdeel van het Zwitserse „Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft”, de „Bundesanstalt für Gewässerkunde” in Koblenz en de Nederlandse Rijkswaterstaat. Deze instanties beschikken over diepgaande kennis betreffende de opbouw van het model.

Het alarmmodel wordt operationeel gebruikt door de hoofdalarmcentrales.

De uitgevoerde werkzaamheden kunnen als volgt worden samengevat:

- Een 1-dimensionaal alarmmodel is ontwikkeld en in de hoofdalarmcentrales geïnstalleerd (zie par. 1.4 en hfdst. 2). Een filmversie maakt het mogelijk het transportverloop als animatie te presenteren.
- Er zijn studies uitgevoerd t.b.v. de berekening van de stroomsnelheden in de Rijn (zie hfdst. 3).

1.3 Organization and execution of activities

The model development was initiated and financially supported by the Rhine riparian states, represented by working group K of the IRC and the coordinators' assembly of the CHR.

A joint IRC and CHR committee of experts was responsible for planning and coordinating the activities.

Detailed planning was done by a working group of model specialists and a working group of tracer experts (see fig. 1.3.1).

The activities were carried out by government institutes, universities and private agencies in Switzerland, Germany, France and the Netherlands.

Support was given by the secretariats of the CHR and the IRC. The CHR secretariat is responsible for the management of the model.

The Federal Institute of Hydrology and Geology in the Swiss Federal Agency for Environment, Forest and Landscape, the Federal Institute of Hydrology in Coblenz (Germany) and the Public Works Department of the Netherlands have appointed so-called model experts to help the main warning centres with possible problems occurring when the alarm model is used. These institutes have in-depth knowledge concerning the structure of the model.

The model is used operationally by the main warning centres in the Rhine basin.

The activities carried out can be summarized as follows:

- A 1-dimensional alarm model was developed and installed at the main warning centres (see paragraph 1.4 and chapter 2). The contaminant transport is made visible by means of a film version.
- Research was carried out for the calculation of the flow velocities in the River Rhine (see chapter 3).

	<p>IRC/CHR-Comité van deskundigen / werkgroep H IRC/CHR Committee of experts / working group H</p> <p>Voorzitter/President: M. Spreafico - LHG Secretaris/Secretary: J.M. Goppel/D. Hogervorst - IRC Leden/Members: H. Engel - BfG O. Havas - SNS A. de Haas - RWS H. Hanisch - BfG F.H.M. van de Ven - RWS</p>
	<p>Sub-werkgroep Ha - alarmmodellen Subgroup Ha - alarm models</p> <p>Voorzitter/President: F.H.M. van de Ven - RWS Modeldeskundigen/ Model experts: A. Jakob - LHG M. Adler - BfG G. Steinebach - BfG O. Havas - SNS G.J.A.A. Broer - RWS Leden/Members: H.C. Klavers - RWS M. Spreafico - LHG H. Engel - BfG Ch. Leibundgut - ALU M. Bremicker - ALU A. van Mazijk - TUD P. Verwoerd - TUD H. Wiesner - ALU</p>
	<p>Sub-werkgroep Ht - tracerproeven Subgroup Ht - tracer experiments</p> <p>Voorzitter/President: H. Hanisch - BfG Leden/Members: M. Spreafico - LHG O. Havas - SNS G.J.A.A. Broer - RWS Ch. Leibundgut - ALU H. Wiesner - ALU</p>

- ALU: Albert-Ludwigs-Universiteit, Freiburg i.Br. - Instituut voor fysische geografie, Leerstoel voor hydrologie / Albert Ludwigs University, Freiburg i.Br., Germany - Institute for physical geography, Chair of Hydrology
- BfG: Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz / Federal Institute of Hydrology, Coblenz
- IRC: Internationale Commissie ter bescherming van de Rijn tegen verontreiniging, Koblenz / International Rhine Commission, Coblenz
- LHG: Landeshydrologie und -geologie, beim Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern / Federal institute of Hydrology and Geology, in the Federal Agency for Environment, Forest and Landscape, Bern
- RWS: Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterzuivering, Lelystad / Public Works Department, Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment, Lelystad
- SNS: Service de la Navigation de Strasbourg / Strasbourg Navigation Agency
- TUD: Technische Universiteit Delft, Vakgroep Gezondheidstechniek en Waterbeheersing, Faculteit der Civiele Techniek / Delft University of Technology, Sanitary Engineering and Water management group, Faculty of Civil Engineering

Fig. 1.3.1 Samenstelling van het comité van deskundigen van IRC en CHR

Fig. 1.3.1 Composition of the IRC/CHR expert group

- Het alarmmodel is gecalibreerd en geverifieerd aan de hand van grootschalige tracerproeven (zie hfdst. 4).
- Daarnaast zijn gevoeligheidsanalyses en onderzoeken met 2-dimensionale stoftransportmodellen uitgevoerd [Van Mazijk 1989, VAW 1990].
- De medewerkers van de hoofdalarmcentrales zijn door middel van twee workshops over het gebruik van het alarmmodel voorgelicht.

1.4 Het alarmmodel voor de voorspelling van stofverspreiding in de Rijn

Uitgaande van de gestelde randvoorwaarden en van het feit dat tijdens calamiteiten de kwantitatieve informatie over de lozing zeer onzeker is, zijn de natuurlijke processen in de eerste ontwikkelingsfase sterk vereenvoudigd gemodelleerd. Zo werd aangenomen dat uitsluitend longitudinale dispersie optreedt, complete menging onmiddellijk na de lozing en stroomafwaarts van zijdelingse instromingen optreedt, dat de stroming stationair is en, indien de verontreiniging afgebroken wordt, deze afbraak uitsluitend lineair is. De eerste variant van het alarmmodel ging dan ook uit van een eendimensionale advection-diffusie-vergelijking (Taylor-vergelijking), die stoftransport in rivieren beschrijft op basis van stroming en longitudinale dispersie. De stroomtijden van het water worden in dit model niet impliciet berekend, maar zijn als functie van de waterstand resp. de afvoer vastgelegd. De regelprogramma's van enkele belangrijke stuwen in de Oberrhein zijn eveneens in het model opgenomen [zie Fischer 1979, Griffioen 1989].

Zoals was verwacht, bleek uit de verificatie van deze eerste modelvariant dat de stroomtijden van de verontreinigingswolk goed konden worden voorspeld. De maximale verontreinigingsconcentratie daarentegen kon slechts in enkele gevallen bevredigend worden berekend terwijl het verloop in de tijd van de verontreinigingsconcentraties niet overeen kwam met het waargenomen verloop. In de natuur worden vaak scheve verdelingen van verontreinigingsconcentraties waargenomen, hetgeen met een eendimensionaal model niet kan worden gereproduceerd. Door de invloed van stagnante zones aanvullend in het oorspronkelijke model in te bouwen, werd daarom de eerste variant van het alarmmodel omgebouwd tot een „quasi tweedimensionaal model” [CHR 1991]. Een

- The calibration and verification of the alarm model was done by means of large-scale tracer experiments (see chapter 4).
- In addition sensitivity analyses and studies concerning a 2-dimensional substance transport model were carried out [Van Mazijk 1989, VAW 1990].
- During two workshops the staffs of the main warning centres were instructed in the use of the alarm model.

1.4 The alarm model for the prediction of substance propagation in the River Rhine

On the basis of the given prerequisites and because it was realized that in case of an accident the quantitative information on the spill is very uncertain, in the first development phase the natural processes were modeled in a highly simplified form. It was for example assumed, that only longitudinal dispersion occurs, that the contaminant completely mixes directly after the spill and downstream from lateral inflows, that flow conditions are steady and that decomposition of the pollutant, if occurring at all, only takes place linearly. Consequently the first version of the alarm model was based on a one-dimensional advection-diffusion-equation (Taylor equation), which describes substance transport in rivers on the basis of flow and longitudinal dispersion. The travel times of the water are not implicitly calculated in this model, but are fixed values which are a function of water level or discharge. The regulation schemes of a few important power plants in the Upper Rhine have also been incorporated in the model [see Fischer 1979, Griffioen 1989].

A verification of this first model variant showed, that in line with expectations the travel times of the pollutant cloud could be predicted accurately, peak concentrations however could only be calculated satisfactorily in some cases and that the distribution of pollutant concentrations in the time domain does not correspond with observations. In nature skewness in the distribution of pollutant concentrations is often observed, but it cannot be reproduced by the one-dimensional model. That is why the influence of stagnant zones was added to the original alarm model, turning the first version into a 'quasi two-dimensional model' [CHR 1991]. There is no analytical solution for an advection-diffusion-equation including modelled stagnant zones, so that an

analytische oplossing van de advectie-diffusie-vergelijking, waarbij rekening wordt gehouden met de stagnante zone modellering, is niet mogelijk zodat toevlucht moest worden genomen tot een door Chatwin [1980] voorgestelde benadering. Deze benadering leidt tot de volgende vergelijking:

approximation proposed by Chatwin [1980] had to be used. This approximation leads to the following equation:

$$\phi_E(x, t) = \frac{M/Q}{\sqrt{(4\pi D_0 t/c^2)}} \cdot \exp \left[\frac{-(t - x/c)^2}{4D_0 t/c^2} \right] \cdot \left[1 + \frac{G_t}{6} \cdot H_3 \left[\frac{t - x/c}{\sqrt{(2D_0 t/c^2)}} \right] \right] \quad (1.4.1)$$

met/where:	ϕ_E : stofconcentratie / substance concentration	(kg/m ³)
	x : coördinaten in langsrichting van de rivier / coordinates in the longitudinal direction of the river	(m)
	t : tijd / time	(s)
	M : massa verontreiniging / quantity of pollutant	(kg)
	Q : afvoer / discharge	(m ³ /s)
	D ₀ : longitudinale dispersiecoëfficiënt / longitudinal dispersion coefficient	(m ² /s)
	c : stoftransportsnelheid / substance transport velocity	(m/s)

$$c = \frac{u_s}{1 + \beta}$$

met/where:	u_s : gemiddelde stroomsnelheid in het stroomvoerende deel van het dwarsprofiel / average flow velocity in the main stream of the river's cross section	(m/s)
	β : quotiënt van stagnante zone oppervlak A _b en stroomvoerend oppervlak A _s (zie fig. 1.4.1) / ratio of stagnant zone area A _b and the main stream area A _s (see fig. 1.4.1)	(-)
	H ₃ : derde hermitepolynoom / third Hermite polynomial (H ₃ (z) = z ³ - 3•z)	(-)
	G _t : scheefheidsparameter / skewness parameter	(-)

De dispersiecoëfficiënt wordt daarbij op de volgende wijze bepaald:

The dispersion coefficient is then obtained as follows:

$$D_0 = \alpha \cdot \frac{u_s^2 \cdot B_s^2}{a \cdot u_*} \quad (1.4.2)$$

α : parameter	(-)
B _s : breedte van het stroomvoerende deel / width of main stream	(m)
a : gemiddelde waterdiepte / average water depth	(m)
u _* : schuifspanningssnelheid / shear velocity	(m/s)

$$u_* = (u_s \cdot \sqrt{g}) / C$$

waarbij de Chézy-coëfficiënt in het model als volgt wordt berekend:

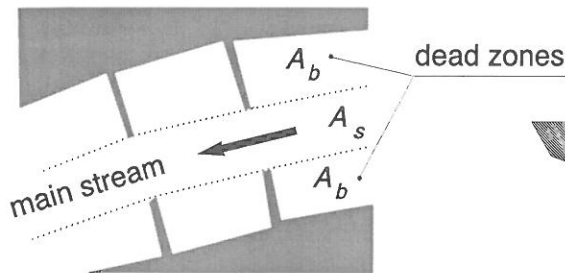
where the Chezy coefficient is calculated in the model by:

$$C = 25 \cdot (a/k_n)^{1/6}$$

als k_n = constante van Nikuradse = 0,2 m dan geldt

$$C = 25 \cdot (a/0,2)^{1/6}$$

g = gravitatieconstante (9,81 m/s²).



(a) plan view of a river section with groynes

Fig. 1.4.1 Stagnant zone parameter

$$\beta = A_b/A_s$$

De invoer van de voor de berekening benodigde gegevens vindt plaats via op het beeldscherm gepresenteerde menu's. Met behulp van het eerste menu kunnen algemene gegevens worden ingevoerd m.b.t. de calamiteit en het waarnemingspunt (zie fig. 1.4.2). Men heeft de keuze een waarde voor de dispersiecoëfficiënt in te voeren of de coëfficiënt door het programma te laten berekenen. Naast opgeloste stoffen bestaat eveneens de mogelijkheid de stroomtijd van drijvende stoffen te schatten. Deze stroomtijd is gebaseerd op de aanname dat het transport plaats vindt aan de oppervlakte van het stroomvoerend gedeelte van de dwarsdoorsnede, hetgeen niet voor alle drijvende stoffen het geval is.

Als lozingstype kan een momentane of een rechthoekige impulslozing worden ingevoerd. Indien de concentratieverdeling van de verontreiniging bekend is, dient deze als tabel te worden ingevoerd. Hiervoor dient het tweede menu dat tabelinvoer mogelijk maakt. Eventueel aanwezige achtergrondconcentraties moeten daarbij van te voren in mindering worden gebracht.

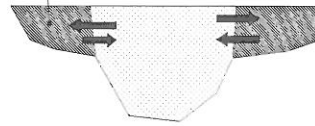
Het derde menu dient voor de invoer van hydrologische gegevens (waterstanden en stuwmanipulaties in het Nederlandse deel van de Rijn). De afvoer wordt bepaald met behulp van in het model geïntegreerde afvoer/waterstand relaties aan de hand van de „real-time” opgevraagde waterstandswaarnemingen.

$$C = 25 \cdot (a/k_n)^{1/6}$$

when k_n = Nikuradse constant = 0.2 m then

$$C = 25 \cdot (a/0.2)^{1/6}$$

g = gravity constant (9.81 m/s²).



(b) cross section

Fig. 1.4.1 Stagnant zone parameter

$$\beta = A_b/A_s$$

The input of the data necessary for the calculation is done by means of display menus. With the first menu general data on the accident and the forecasting cross section can be entered into the computer (see fig. 1.4.2). The user has two options: he can give a value for the dispersion coefficient or he can let the programme calculate this coefficient. Besides dissolved substances there is also the possibility to estimate the travel times of floating substances. As these calculations are based on the assumption that the substance is transported in the main stream on the surface, they are not suitable for all floating substances.

For release type an instantaneous or a rectangular impulse can be given. When the concentration distribution of the pollutant is known, this should be typed in in the form of a table. For this input a second menu is available. Possible background concentrations present should be subtracted beforehand.

The third menu serves for the input of hydrological data (water levels and weir regulation in the Dutch part of the River Rhine). The discharge is calculated from the water level observations, obtained real-time, by means of the stage-discharge relations incorporated in the model.

```

08-23-1993 | IRC/CHR Alarmmodel Rijn V2.1 | 08:19:54
< 1> Titel = Lozing 1234
< 2> Lozingstak = Bovenrijn Kilometrage = 171
< 3> Type lozing = Tabel Aantal paren = 24
< 4> Dispersiecoefficient = Default
< 5> Halfwaardetijd (d) = Geen afbraak
< 6> Drijvende stof = Nee
< 7> Waarnemingsgebied = Rijngebied
< 8> Waarnemingstak = Bovenrijn Kilometrage = 800
< 9> Datum ongeluk = 8811-2712

```

```

08-23-1993 | IKSR/KHR Alarm model Rhine V2.1 | 08:19:54
< 1> Title = Spill 1234
< 2> Release section = Upper Rhine Release km = 171
< 3> Release type = Table Number of pairs = 24
< 4> Dispersion coeff. = Default
< 5> Half life time (T) = No break down
< 6> Floating substance = No
< 7> Observation area = Rhine basin
< 8> Observation section = Upper Rhine Observat. km = 800
< 9> Date of the accident = 8811-2712

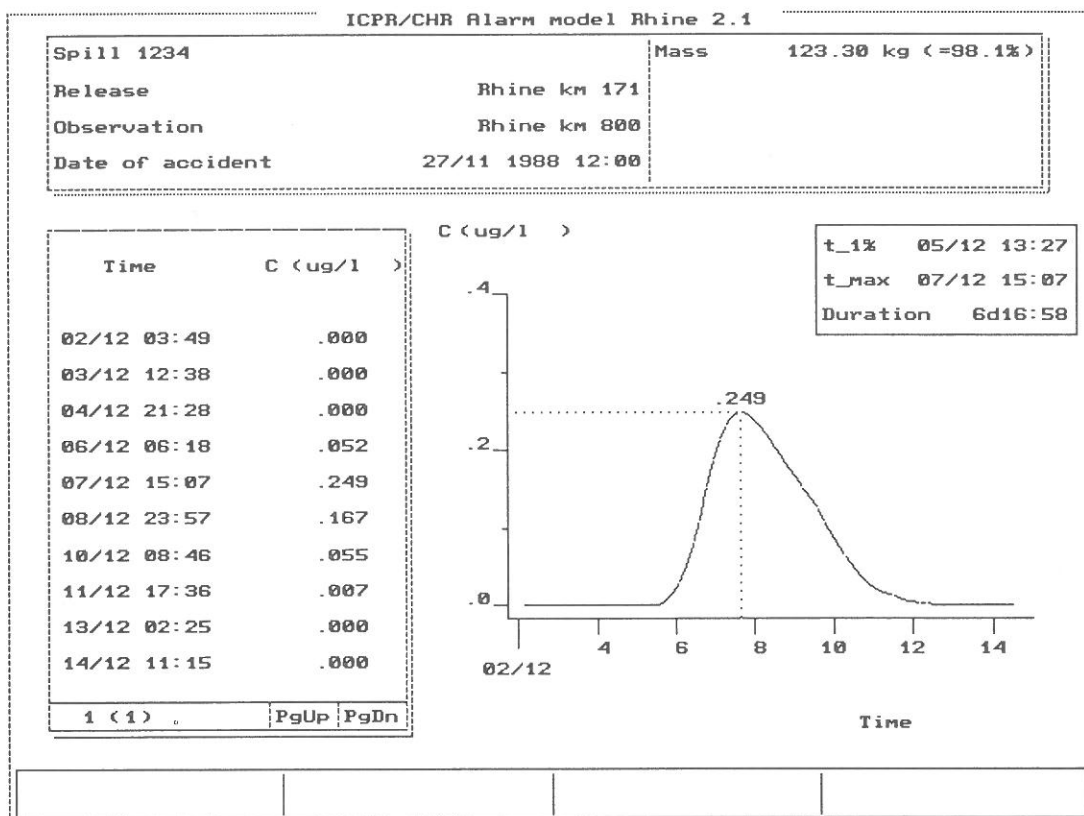
```

Fig. 1.4.2 Overzicht van de invoergegevens in invoermenu 1

Fig. 1.4.2 Summary of the input variables of input menu 1

Het resultaat is een tabellarische en een grafische presentatie van de passage van de verontreinigingsgolf in de gewenste waarnemingsdoorsnede (zie fig. 1.4.3). Tegelijkertijd kunnen voor belangrijke lokaties langs de Rijn de te verwachten maximale verontreinigingsconcentraties worden gepresenteerd.

As a result, the model produces a table and a graphical presentation of the passing of the contaminant in the control cross section selected (see paragraph 1.4.3). At the same time the maximum pollutant concentrations to be expected can be presented for important locations along the River Rhine.



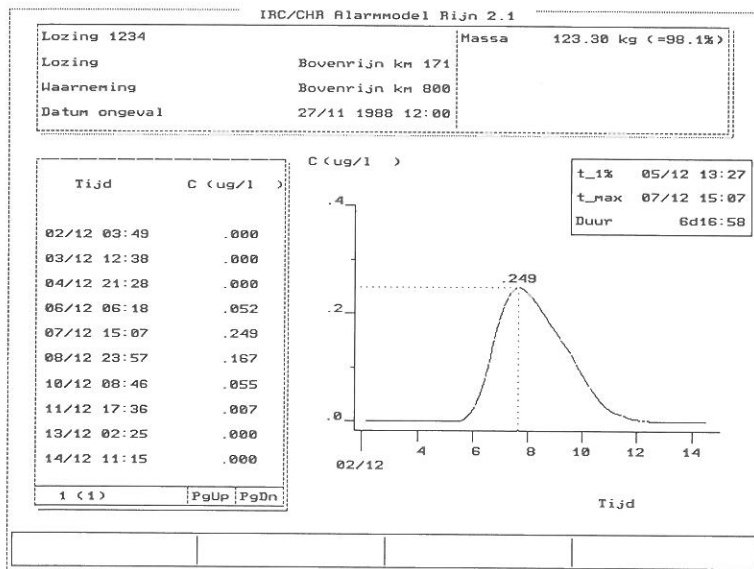


Fig. 1.4.3 Te verwachten verontreinigingsconcentraties in de voorspellingsdoorsnede

Fig. 1.4.3 Pollutant concentrations to be expected in the prediction cross section

Voor het model zijn gemiddelde stroomtijden nodig. Voor het Zwitserse Rijntraject van Stein am Rhein tot Bazel en voor de Aare van de Bielersee tot de monding in de Rijn werden deze door de „Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie” met behulp van het computerprogramma FLORIS berekend. Dit programma simuleert instationaire (en in speciale gevallen ook stationaire) afvoeren in open goten. Daarbij worden de continuïteits- en de impulsvergelijking van De Saint-Venant met behulp van een differentiemethode opgelost [LHG 1991]. Fig. 1.4.4 toont een diagram van op deze wijze berekende stroomtijden. De stroomtijdberekeningen tussen Bazel en Lobith alsmede voor de Moezel zijn bepaald aan de hand van berekende en gemeten waterstandsverlopen bij diverse afvoersituaties. Voor de bepaling van de stroomtijden benedenstrooms van Lobith is het hydrodynamische model ZWENDL toegepast.

For the model average travel times of the water had to be made available. For the Swiss Rhine section from Stein am Rhein to Basel and for the Aare from the Lake of Biel to the confluence with the Rhine, the Swiss Research Station for Hydraulic Engineering, Hydrology and Glaciology calculated the average travel times by means of the FLORIS computer programme. This programme simulates unsteady (and as a special case also steady) flow in open channels. The Saint-Venant equations for unsteady flow are solved by means of a finite difference method [LHG 1991]. Figure 1.4.4 shows a diagram of travel times calculated in this way. The travel time computations for the stretch between Basel and Lobith and for the Moselle are based measured an calculated water level distributions along the considered river stretches. For the travel times computations downstream from Lobith the hydrodynamic model ZWENDL was used.

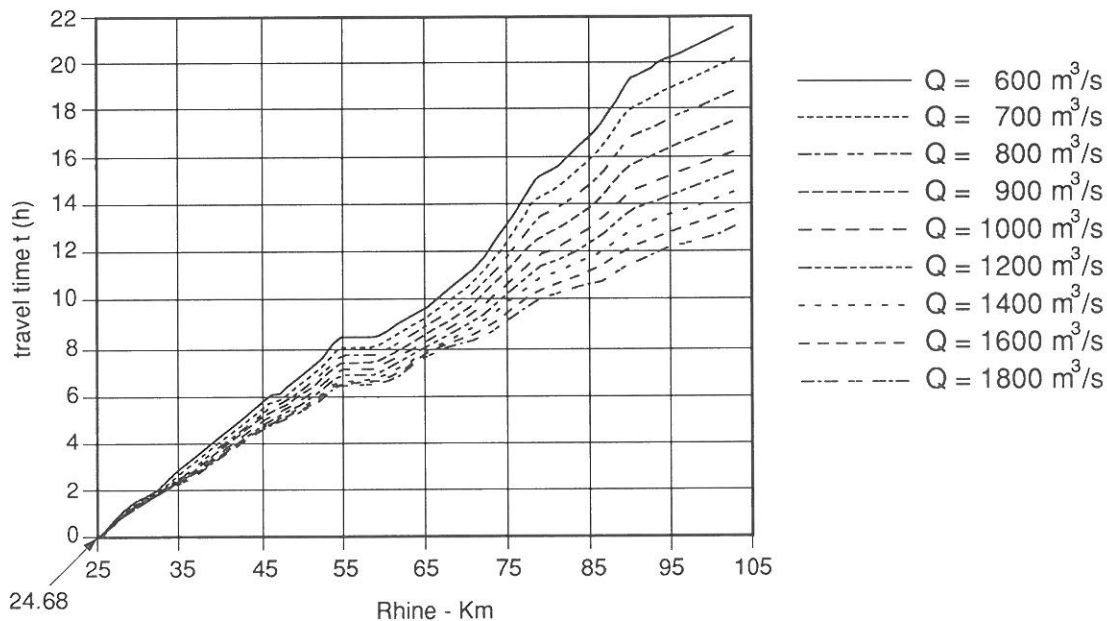


Fig. 1.4.4 Stroomtijden in de Rijn van Stein am Rhein km 24,680 tot de monding van de Aare km 103,000

Fig. 1.4.4 Travel times in the Rhine from Stein am Rhein km 24.680 to the confluence with the Aare km 103.000

De calibratie en verificatie van het alarm-model is uitgevoerd aan de hand van tracerproeven [CHR 1991] in Zwitserland, Frankrijk, Duitsland en Nederland. In Zwitserland bijv. zijn twee grote tracerproeven in de Rijn uitgevoerd, één van Albruck tot Bazel en één van Rheinau tot Bazel. Hoofddoel van deze proeven was de bepaling van de looptijd van de tracerwolk. Daarnaast werden echter ook de stofdispersie in stuwpannen en de menging na het instromen van de Aare in de Rijn onderzocht. Verder dienden de op experimentele wijze bepaalde resultaten van de tracerexperimenten ook voor het vergelijken van transporttijden van opgeloste stoffen met gemiddelde stroomtijden, zoals deze waren berekend door het FLORIS-model. De vergelijking laat een goede overeenkomst zien tussen de met behulp van beide methoden bepaalde stroomtijden. Fig. 1.4.5 toont de transversale verdeling van de tracer in een dwarsprofiel 15 km benedenstrooms van het lozingspunt te Albruck. De tracer werd het eerst zichtbaar in de hoofdstroom. Een kwartier later kon de tracer in de gehele dwarsdoorsnede, met uitzondering van het gedeelte direct langs de oever, worden gemeten. Om

The alarm model was calibrated and verified by means of tracer experiments [CHR 1991] in Switzerland, France, Germany and the Netherlands. In Switzerland, for example, two major tracer experiments were realized in the Rhine; one from Albruck to Basel and one from Rheinau to Basel. Main aim of these experiments was to determine the travel time of the tracer cloud, but the propagation of the substance in impounding reservoirs and the mixing of the Aare in the Rhine were studied as well. Moreover the experimentally determined results of the tracer experiments were also used to compare transport times of dissolved substances with the average travel times of the water as determined with the FLORIS model. This comparison showed that the travel times calculated with both methods corresponded well. Figure 1.4.5 shows the transverse distribution of the tracer in a cross section, 15 km downstream from the input site at Albruck. The tracer first appeared in the channel line. 15 minutes later it could be detected in the whole cross section except the bank zones. At 12.50 h. the maximum concentration of the tracer flowed by, the highest

12.50 uur passeerde de maximale concentratie van de tracer, waarbij de hoogste concentratie in de hoofdstroom optrad. Daarna nam de concentratie in de hoofdstroom gelijkmatig af en om 14.00 uur was ze 5 maal kleiner dan die in de oevertzone.

concentration occurring in the channel line. After that, the concentration in the channel line continuously decreased and at 14.00 h. it was 5 times lower than in the bank zone.

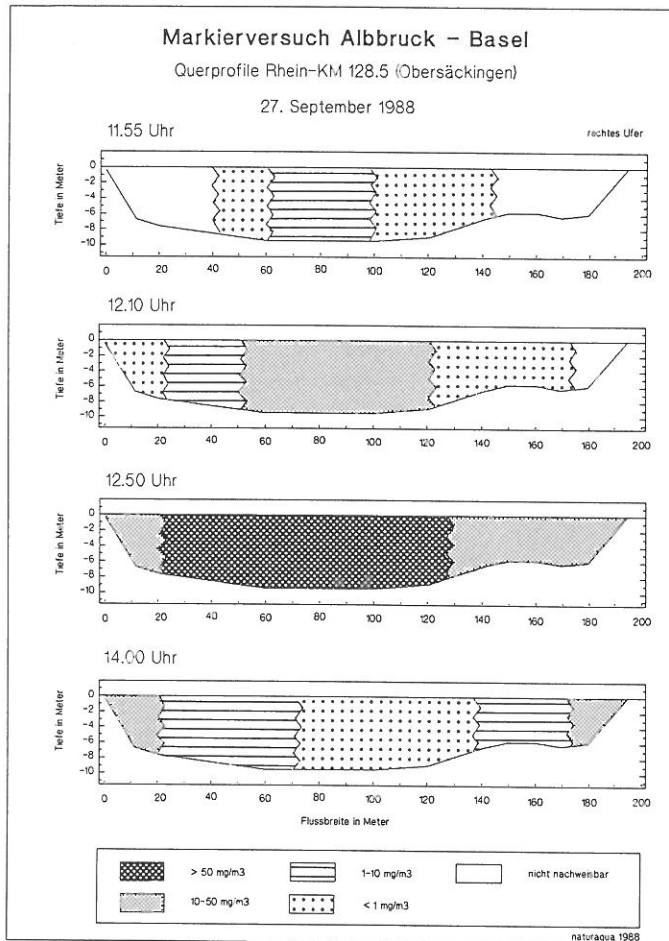


Fig. 1.4.5 Tracerverdeling in het dwarsprofiel Obersäckingen km 128,500

Fig. 1.4.5 Tracer distribution in the cross section at Obersäckingen km 128.500

1.5 Beoordeling van het alarmmodel

Op basis van de tot nu toe in de hoofdalarmcentrales opgedane ervaringen kan het alarmmodel worden beschouwd als een nuttig hulpmiddel voor de doelgerichte alarmering in het geval van een calamiteit op de Rijn. Vanwege de aangebrachte vereenvoudigingen is het model echter niet in staat alle processen van de verspreiding van een verontreiniging exact weer te geven. De daardoor veroorzaakte fouten in de voorspelling zijn echter klein in vergelijking tot fouten die kunnen worden veroorzaakt door onbetrouwbare invoergegevens. De hoeveelheid geloosde stof bij een calamiteit kan bijvoorbeeld vaak slechts zeer onnauwkeurig worden geschat. Daarom is voorlopig afgezien van een verdere verbetering van het alarmmodel en gaat momenteel de aandacht uit naar het verbeteren van de betrouwbaarheid van de invoergegevens. Zo wordt bijvoorbeeld momenteel in Basel een waterkwaliteitsmeetstation gebouwd dat in staat is verontreinigingsconcentraties in de Rijn relatief snel vast te stellen.

Zoals reeds vermeld, wordt het alarmmodel in zijn huidige vorm als operationeel beschouwd en is er voorlopig geen nieuwe versie te verwachten. Indien bij het gebruik onvolkomenheden op zullen treden, worden deze uiteraard verholpen.

Op regionaal, nationaal en bilateraal niveau vinden echter nog aanvullende studies plaats die in nauw verband staan met het alarmmodel en in een latere fase kunnen leiden tot een verbetering resp. uitbreiding van het model. Als voorbeelden van dergelijke studies kunnen worden genoemd:

- Tracerproeven in de Aare en de Moezel.
De riviertrajecten van de zijrivieren Aare en Moezel zijn momenteel reeds structureel in het alarmmodel ingebouwd. De calibratie en verificatie moeten echter nog plaatsvinden aan de hand van de resultaten van tracerproeven.
- Ontwikkeling van een 2-dimensionaal stoftransportmodel.
Op het ogenblik zijn in Zwitserland werkzaamheden gaande ten behoeve van de ontwikkeling van een 2-dimensionaal stoftransportmodel, waarmee een gedetailleerde berekening mogelijk is van het transport van verontreinigingen bij complexe afvoersituaties. Dit model is in staat de verspreiding van een verontreiniging te simuleren, ook in de

1.5 Evaluation of the alarm model

The experiences of the main warning centres up till now indicate that the alarm model is a useful tool for an effective alert system in case of an accidental spill in the River Rhine. Because of the simplifications made, however, the model is not capable to reproduce accurately all processes involved in contaminant propagation. Still the errors in the predictions caused by this inadequacy are insignificant compared to the errors due to the use of inaccurate input data. For example, the quantity of contaminant spilled in an accident can often only be estimated very roughly. That is why it was decided not to improve the alarm model further, but instead to give priority to improving the accuracy of the input variables. In Basel, for instance, a water quality monitoring station is currently being built which is able to determine concentrations of contaminants in the River Rhine in a relatively short time.

As was mentioned before, the alarm model in its present form is considered operational and no new version is planned for the near future. Of course any defects occurring when the model is used will be remedied.

Additional research projects are carried out on a regional, national and bilateral scale. They are closely connected with the alarm model and could in a later phase lead to improvement or extension of the model. Such studies are:

- Tracer experiments in the Aare and in the Moselle.
The river stretches of the Aare and Moselle tributaries have already been incorporated structurally into the present alarm model. However they will still have to be calibrated and verified by means of the results of tracer experiments.
- Development of a two-dimensional substance transport model.
At the moment a two-dimensional substance transport model is being developed in Switzerland. This will enable a more detailed computation of contaminant transport under complex discharge conditions. With this model it is possible to simulate contaminant propagation in the vicinity of the site of a spill or at a confluence as well. As the river

nabijheid van het lozingspunt of bij de instroming van zijrivieren. Door de onderverdeling van de rivier in naast elkaar liggende stroombanen wordt de voorspelling van het stoftransport zowel in de hoofdstroom als in de oeverzone mogelijk. De inbouw van nieuwe afbraakroutines moet tot een nauwkeuriger beschrijving van de concentratieverdeling van de verontreiniging leiden. Het 2-dimensionale model is niet als vervanging van het alarmmodel bedoeld, maar kan problemen oplossen die door het 1-dimensionale alarmmodel niet of onvoldoende kunnen worden opgelost [VAW 1990].

- Model voor gestuwde riviertrajecten in Nederland.
Voor het Nederlandse Rijntraject tussen Lobith en Hagestein wordt een detailmodel ontwikkeld voor een nauwkeurige berekening van de stroomtijden bij lage afvoeren.
- Gedetailleerde modellering van de invloed van stagnante zones op het stoftransport.
Er wordt wetenschappelijk onderzoek gedaan naar de transportprocessen tussen stagnante zones en de hoofdstroom, om zo het effect van afzonderlijke zones en een reeks zones op het stoftransport beter te kunnen beschrijven.

Het CHR-secretariaat zal in de toekomst het onderhoud en de actualisering van de variabele gegevens in het alarmmodel (bijv. het aanpassen van de ingebouwde Q/H-relaties) coördineren. De hiervoor noodzakelijke financiële middelen zullen worden verworven door verkoop resp. leasing van het model.

Als laatste dient te worden vermeld, dat de samenwerking tussen de betrokken instanties uit vier landen verheugend coöperatief is verlopen en een vruchtbare uitwerking heeft gehad op betreffende activiteiten in de diverse landen. De samenwerking van twee stroomgebiedscommissies heeft haar waarde bewezen en dient te worden beschouwd als een voorbeeld voor de aanpak van gemeenschappelijke problemen.

is divided into adjacent flow tubes, it becomes possible to predict the substance transport in the middle of the river as well as in the bank reaches. The incorporation of new substance decomposition routines should enable a more accurate description of the contaminant concentration distribution. The two-dimensional model is not meant to substitute the alarm model, but it can help to solve the type of problems which cannot or only partly be solved by the one-dimensional model [VAW 1990].

- Model for the weir-regulated river stretches in the Netherlands.
For the Rhine stretch in the Netherlands between Lobith and Hagestein a detailed model is developed to make an accurate computation of travel times during low water conditions.
- Detailed modelling of the effect of stagnant zones on substance transport.
A scientific study of the transport phenomena between stagnant zones and the main stream is carried out in order to come to a better description of the effect of separate zones and a series of zones on substance transport.

In future the CHR secretariat will coordinate the maintenance and up-dating of the variables in the alarm model (for instance the adjustment of the built-in stage-discharge curves of the basic stations). The required financial means will be obtained by selling or leasing the model.

Finally it should be mentioned that the institutes from the four countries involved worked together in a pleasingly cooperative way, which had an inspiring effect on the activities carried out in the individual countries. The cooperation between the two river basin commissions proved satisfactory and should be considered an example of how to overcome common problems.

1.6 Literaturübersicht / Literatuur / Bibliography

- Adler, M. (1990): Fließzeiten in der Mosel aus Wasserspiegellagenberechnungen, BfG - 0532, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
- Becker, A. und P. Sosnowski (1969): Eine Impulsantwort für Flußabschnitte zur Surchflußvorherbestimmung, Wasserwirtschaft - Wassertechnik, 19. Jg., Heft 12, S. 410-418
- Bremicker, M. (1989): Verfahren zur Analyse und Simulation der Stoffausbreitung in Fließgewässern, Diplomarbeit am Institut für Physische Geographie, Lehrstuhl für Hydrologie, Universität Freiburg
- Chatwin, P.C. (1980): Presentation of longitudinal dispersion data, Proc. ASCE J. Hydr. Div. 106 HY1 S. 71-83
- CHR/KHR (1978): Das Rheingebiet, Hydrologische Monographie / Le bassin du Rhin, Monographie hydrologique, Staatsuitgeverij Den Haag, ISBN 90-1201-775-0
- CHR/KHR (1993): Alarmmodell Rhein. Rhein Aktuell, Informationsschrift der IKSR
- Craenenbroek, W. van, J. Marivoet und P. Stas (1985): Wasserverwaltung und Dispersion im Albertkanal und in den Kempischen Kanälen (in niederländischer Sprache), Freie Universität von Brüssel, Dienst Hydrologie
- DVWK (Hrsg.) (1987): Eignung und Anwendung von Vorhersagemodellen für einen »Warn- und Alarmplan Rhein«, Bericht des DVWK Arbeitskreises »Warn- und Alarmplan Rhein«, Koblenz
- Engel, H., T. Menzel und K. Wander (1988): Fließzeiten im Rhein aus Wasserspiegelberechnungen. Bericht BfG-0429 der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, 19 S.
- Fischer, H.B., E.J. List, R.C.Y. Koh, J. Imberger und N.H. Brooks (1979): Mixing in inland and coastal waters, Academic Press, New York
- Gelhar, L.W. und M.A. Collins (1971): General analysis of longitudinal dispersion in nonuniform flow, Water Resources Research, Vol. 7, Nr. 6
- Griffioen, P.S. (1989): Alarmmodell für den Rhein / Modèle d'alerte pour le Rhin, IKSR/KHR-Expertengruppe, KHR-Bericht Nr. II-2
- Hofstraat, J.W., M. Steendijk, G. Vriezokolk, W. Schreurs, G.J.A.A. Broer und N. Wijnstok (19xx): Sensitive and selective determination of Rhodamine WT water tracer by solid-phase extraction and reversed-phase HPLC with fluorescence detection. Ministry of Transport and Public Works, The Hague & Lelystad
- IKSR (1987): Internationaler Warn- und Alarmdienst »Rhein«. Regelung der IKSR-Arbeitsgruppe Pa 47/87
- Kalweit, H., K.R. Nippes, H. Gerhard, W. Buck, K. Felkel, H. Schmitz, B. Ploeger und J. van Malde (1993): Der Rhein unter der Einwirkung des Menschen. KHR-Bericht Nr. I-11. ISBN 90-7098-00-88
- Leibundgut, Ch., J. Petermann und B. Schudel (1988): Markerversuch Rhein »Albbruck-Basel«, Beschaffung von Eingabedaten für ein Alarm- und Stofftransportmodell mittels Traceruntersuchungen. Universität Bern, Geographisches Institut in Zusammenarbeit mit Naturaqua, Bern, Dezember 1988
- Leibundgut, Ch., M. Bremicker und H. Wiesner (1990): Markerversuch Rhein 04/89, Abschlußbericht, Institut für Physische Geographie, Lehrstuhl für Hydrologie, Universität Freiburg
- Leibundgut, Ch. und H. Wiesner (1990): Markerversuch Rhein 09/90, Zwischenbericht der ersten Meßergebnisse, Institut für Physische Geographie, Lehrstuhl für Hydrologie, Universität Freiburg

- Leibundgut, Ch. und A. van Mazijk (1992): Investigation of flow and transport parameters in rivers. Proceedings of the 6th international symposium on water tracing, Karlsruhe
- Leibundgut, Ch., A. van Mazijk, J.M.C. van Mierlo und H. Wiesner (1992): Verifikation des Alarmmodells für den Rhein, Version 2.1. Bericht des Institutes für Physische Geographie der Universität Freiburg und der Fachgruppe Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung der Fakultät für zivile Technik der Technischen Universität Delft
- Leibundgut, Ch. und H. Wiesner (1992): Markierversuch Rhein 06/91, Abschlußbericht, Institut für Physische Geographie, Lehrstuhl für Hydrologie, Universität Freiburg, August 1992
- LHG (1991) - Kühne, A., Ch. Leibundgut, J. Petermann, B. Schädler, B. Schudel, G. Schneider und M. Spreafico (1991): Fließzeitbestimmung und Stofftransportuntersuchungen im Rhein. Mitteilung Nr. 13 der Landeshydrologie und -geologie, Bern
- Mazijk, A. van, R.M. Noppeney, T. van Ellen und P. Verwoerd (1989): Empfindlichkeitsanalyse des Alarmmodells für den Rhein (niederländische Version), Mitteilung Nr. 27 der Fachgruppe Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung der Fakultät für zivile Technik der Technischen Universität Delft in Zusammenarbeit mit Rijkswaterstaat, Dienst für Binnengewässer/RIZA, Mai 1989
- Mazijk, A. van (1989a): Empfindlichkeitsanalyse des Alarmmodells für den Rhein. Technische Universität Delft, Fakultät für zivile Technik, Fachgruppe Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung in Zusammenarbeit mit Rijkswaterstaat, Dienst für Binnengewässer/RIZA, Mai 1989
- Mazijk, A. van und P. Verwoerd (1989): Eichung eines stationären Stillwasserzonenmodells anhand des Markierversuches »Albruck-Basel«. Technische Universität Delft, Fakultät für zivile Technik, Fachgruppe Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung in Zusammenarbeit mit Rijkswaterstaat, Dienst für Binnengewässer/RIZA, Oktober 1989
- Mazijk, A. van und J.M.C. van Mierlo (1991): Kalibrierung des Alarmmodells für den Rhein anhand des Markierversuches 07/89 Rheinau-Basel. Technische Universität Delft, Fakultät für zivile Technik, Fachgruppe Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung in Zusammenarbeit mit Rijkswaterstaat, Dienst für Binnengewässer/RIZA, April 1991
- Mazijk, A. van, P. Verwoerd und J.M.C. van Mierlo (1991): Kalibrierung des Alarmmodells für den Rhein anhand des Markierversuches 04/89 Village Neuf-Niederlande. Technische Universität Delft, Fakultät für zivile Technik, Fachgruppe Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung in Zusammenarbeit mit Rijkswaterstaat, Dienst für Binnengewässer/RIZA, April 1991
- Mazijk, A. van und J.M.C. van Mierlo (1991): Kalibrierung des Alarmmodells für den Rhein anhand des Markierversuches 09/88 Albruck-Basel. Technische Universität Delft, Fakultät für zivile Technik, Fachgruppe Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung in Zusammenarbeit mit Rijkswaterstaat, Dienst für Binnengewässer/RIZA, März 1991
- Mazijk, A. van, J.M.C. van Mierlo und H. Wiesner (1991): Verifikation des Alarmmodells für den Rhein Version 2.0. Technische Universität Delft, Fakultät für zivile Technik, Fachgruppe Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung in Zusammenarbeit mit Rijkswaterstaat, Dienst für Binnengewässer/RIZA, Juni 1991
- Mazijk, A. van, P. Verwoerd, J.M.C. van Mierlo, M. Bremicker und H. Wiesner (1991): Rheinalarmmodell Version 2.0, Kalibrierung und Verifikation. IKS/R/KHR-Expertengruppe, KHR-Bericht Nr. II-4
- Mazijk, A. van und J.M.C. van Mierlo (1992): Überprüfung der Kalibrierung des Rheinalarmmodells Version 2.1 anhand des Markierversuches 04/89 Village Neuf-Niederlande. Technische Universität Delft, Fakultät für zivile Technik, Fachgruppe Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung in Zusammenarbeit mit der Universität Freiburg, Institut für Physische Geographie, Lehrstuhl für Hydrologie

- Mazijk, A. van (1992): Neukalibrierung und Verifikation der Hochrheinstrecke im Rheinalarmmodell Version 2.1. Technische Universität Delft, Fakultät für zivile Technik, Fachgruppe Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung in Zusammenarbeit mit Rijkswaterstaat, Staatliches Amt für Integralverwaltung der Binnengewässer und Abwasserreinigung RIZA, Juni 1992
- Mazijk, A. van, J.M.C. van Mierlo, H. Wiesner und Ch. Leibundgut (1992): Verifikation des Rheinalarmmodells anhand der Tracerversuche 06/91 und 07/91. Technische Universität Delft, Fakultät für zivile Technik, Fachgruppe Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung in Zusammenarbeit mit der Universität Freiburg, Institut für Physische Geographie, Lehrstuhl für Hydrologie, Dezember 1992
- Mazijk, A. van, H. Wiesner und Ch. Leibundgut (1992): Das Alarmmodell für den Rhein - Theorie und Kalibrierung der Version 2.0. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, Heft 2, Koblenz
- Nordin, C.F. und B.M. Troutman (1980): Longitudinal dispersion in rivers: the persistence of skewness in observed data, *Wat. Resources Res.* Vol. 16, Nr. 1, S. 123-128
- Noppene, R.M. (1988): Der Einfluß von Stillwasserzonen auf die Dispersion (in niederländischer Sprache), Mitteilung Nr. 19 der Fachgruppe Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung der Fakultät für zivile Technik der Technischen Universität Delft in Zusammenarbeit mit Rijkswaterstaat, Dienst für Binnengewässer/RIZA
- Noppene, R.M. (1988): Der Einfluß von »Near-Field«-Prozessen auf die »Far-Field«-Dispersionsbeschreibung (in niederländischer Sprache), Mitteilung Nr. 22 der Fachgruppe Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung der Fakultät für zivile Technik der Technischen Universität Delft in Zusammenarbeit mit Rijkswaterstaat, Dienst für Binnengewässer/RIZA, November 1988
- Petermann, J., B. Schudel, Ch. Leibundgut, M. Grossauer und D. Morgenthaler (1989): Markierversuch Rhein »Rheinau-Basel«, Beschaffung von Eingabedaten für ein Alarm- und Stofftransportmodell mittels Traceruntersuchungen. Universität Bern, Geographisches Institut in Zusammenarbeit mit Naturqua, Bern, September 1989
- Service de La Navigation de Strasbourg (1989): Essai de traçage du novembre 1988, Straßburg 1989 (Unveröffentlichte lose Datensammlung)
- Service de La Navigation de Strasbourg (1990): Essai de traçage sur le Rhin du 15 mai 1990, Rapport octobre 1990, Straßburg
- Spreafico, M. und Ch. Leibundgut (1989): Travel-time and transport forecasting of dissolved material within the Rhine
- Spreafico, M., Ch. Leibundgut und A. Kühne (1989): Abschätzung von Fließzeiten und Konzentrationen von mitgeführten Stoffen im Rhein, Gas-Wasser-Abwasser, Heft 9 des Schweizerischen Vereins des Gas- und Wasserfaches, Zürich, S. 559-564
- Spreafico, M. (1992): Alarmmodell Rhein. Wasser, Energie, Luft, Heft 11/12, Baden
- Steinebach, G. (1990): Vergleich einiger Methoden zur Lösung eines einfachen Stofftransportmodelles. Interner Bericht der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
- Teuber, W. und K. Wander (1987): Fließzeiten im Rhein aus Flügelmessungen. Bericht BfG-0392 der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, 32 S.
- Valentine, E.M. und I.R. Wood (1977): Experiments in Longitudinal Dispersion with Dead Zones, *Proc. ASCE J. Hydr. Engrg.* Vol. 105 HY8, S. 999-1016
- Ven, F.H.M. van de und G.J.A.A. Broer (1991): Accidental pollution control for the river Rhine

- VAW (1990): Stofftransportmodell für Fließgewässer, Entscheidungsgrundlagen zur Entwicklung und Anwendung numerischer Modelle. Bericht der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zürich, 62 S.
- VAW (1990a): Fließzeiten im Rhein, Berechnung von mittleren Abflußgeschwindigkeiten und Fließzeiten mit dem hydrodynamischen Modell FLORIS. Bericht der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zürich, 96 S.
- VAW (1992): Fließzeiten in der Aare, Berechnung von mittleren Abflußgeschwindigkeiten und Fließzeiten mit dem hydrodynamischen Modell FLORIS. Bericht Nr. 788 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zürich
- Verwoerd, P. und R. Terveer (1990): Alarmmodell »Rhein«, Beschreibung der Fortran-Quellcode des Alarmmodells »Rhein« Version 2.0, Systemdokumentation. Bericht 90.058X des Rijkswaterstaat, Dienst für Binnengewässer und der Technische Universität Delft, Fakultät für zivile Technik, Fachgruppe Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung, 71 S.

2. DIE INTEGRATION DES ALARMMODELLES IN DAS ALARMSYSTEM RHEIN

M. Spreafico

Landeshydrologie und -geologie, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 3003 Bern

Die Rheinanliegerstaaten betreiben im Rahmen der IKSR und der Internationalen Kommission zum Schutze der Mosel und der Saar ein Alarm- und Informationssystem bei unfallbedingter Verschmutzung des Rheinwassers. Das Warn- und Alarmsystem verfolgt das Ziel, plötzlich auftretende Verunreinigungen mit wassergefährdenden Stoffen, die in ihrer Menge oder Konzentration die Gewässergüte des Rheins nachteilig beeinflussen könnten, weiterzumelden und die zur Bekämpfung von Schadenereignissen zuständigen Behörden und Stellen zu warnen und zu informieren. Diese sollen dadurch in die Lage versetzt werden, die Gefahrenabwehr, die Ursachenfeststellung und die Verursacherermittlung zu organisieren sowie die Maßnahmen zur Beseitigung der Schäden und zur Verminderung von Folgeschäden zu planen. Darüber hinaus soll das System auch die Weiterleitung von Informationen über Bagatellfälle ermöglichen, wenn aus psychologischen Überlegungen eine Information der Bevölkerung als notwendig erachtet wird.

Das Alarmsystem basiert auf den acht sogenannten Hauptwarnzentralen Gewässerschutzamt Basel-Stadt, Préfecture du Bas-Rhin, Strasbourg, Wasserschutzpolizeidirektion Baden-Württemberg, Mannheim, Wasserschutzpolizeistation Koblenz, Regierungspräsidium Düsseldorf, Rijkswaterstaat directie Gelderland, Arnhem, Préfecture de la Moselle, Metz und Service de la Protection Civile, Luxembourg sowie das Sekretariat der IKSR (siehe Abb. 2.1.1).

Die Warnung und Entwarnung erfolgt anhand eines genau definierten Ablaufprozederes mit klar festgelegten Meldeschemata. So hat eine Meldung immer die folgenden Informationen zu enthalten:

- Angaben zur Hauptwarnzentrale, von der die Meldung stammt
- Meldeperson, Datum und Uhrzeit
- Angaben zur Hauptwarnzentrale, welche den Alarm als erste ausgelöst hat
- Angaben zum Unfallzeitpunkt, zur Unfallstelle, zur Unfallart und zum Unfallstoff
- Angaben über die Menge des ins Wasser gelangten Schadstoffes und dessen Einfließdauer
- Information über das bereits festgestellte Ausmaß der Verschmutzung des Gewässers (Fischsterben, Verfärbung des Wassers, Geruchsentwicklung, Länge und Breite eines schwimmenden Teppichs)
- Angaben über bereits getroffene Maßnahmen.

Weitergehende wichtige Informationen müssen oftmals erst bei Sachverständigen beschafft resp. erstmals berechnet werden. An solchen Informationen, die später weitergemeldet werden können, sind zu nennen:

- Wasserstände an Pegelstationen (an vielen ist eine automatische Abfrage über Telefon möglich)
- Abflüsse
- Fließgeschwindigkeit
- Berechnete und gemessene Konzentrationen des Unfallstoffes im Gewässer
- Auswirkungen auf die Gewässergüte.

Die Meldung kann als Information oder als Warnung durchgegeben werden.

Meldungen dieses Alarmsystems werden sofort an die lokalen und landesinternen Warndienste weitergeleitet, die ihrerseits die notwendigen Maßnahmen ergreifen.

Das heute in allen Hauptwarnzentralen installierte Alarmmodell, erlaubt den verantwortlichen Behörden die Beschaffung der hydrologischen Grunddaten über Wasserstände und Abflüsse sowie die Berechnung, der für die Meldung notwendigen Informationen über die Konzentration des Schadstoffes und seiner zukünftigen Ausbreitung. Das Alarmmodell stellt deshalb einen wichtigen Bestandteil des Alarmsystems dar.

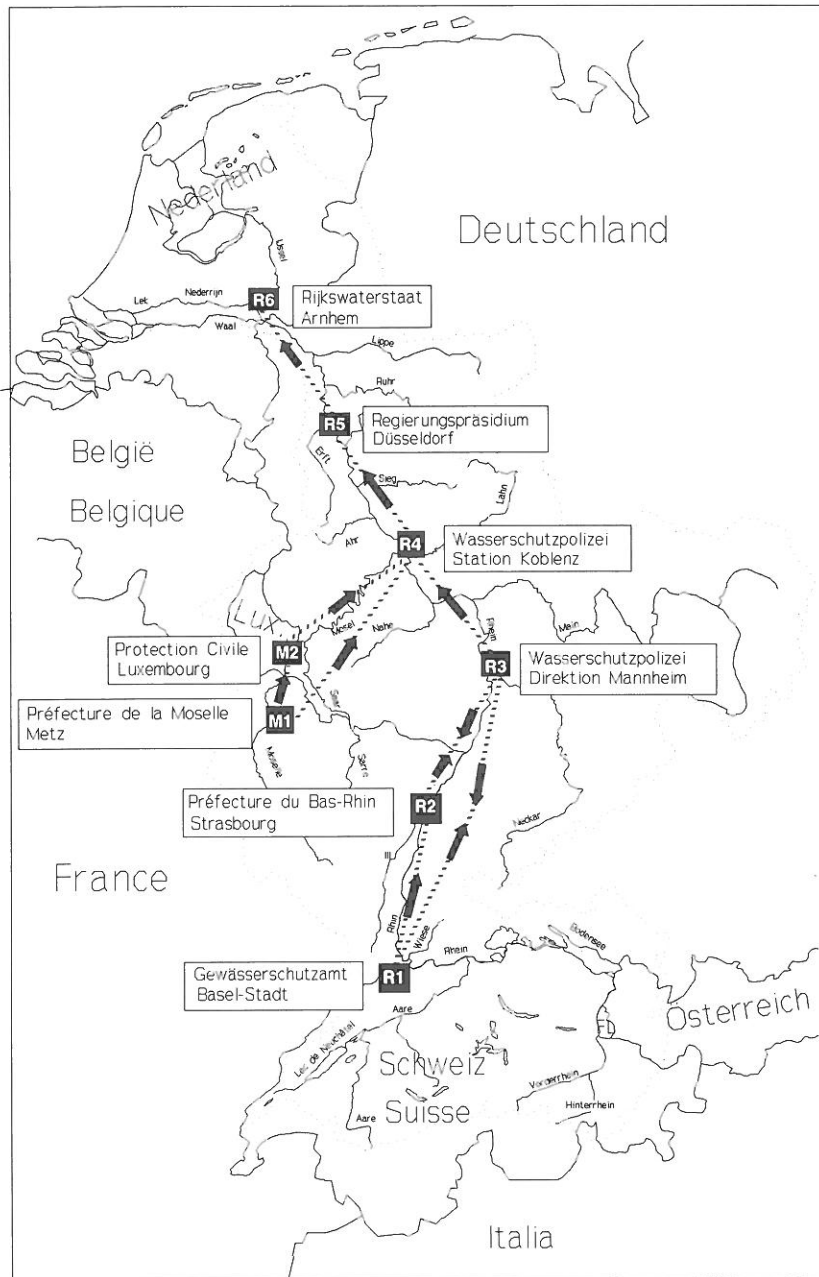


Abb. 2.1.1 Internationales Alarmsystem im Rhein bei Störfällen

Literatur

IKSR (1987): Internationaler Warn- und Alarmdienst »Rhein«, Regelung der IKSR-Arbeitsgruppe Pa 47/87

3. HYDRAULISCHE GRUNDLAGEN

M. Adler - Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

A. Jakob - Landeshydrologie und -geologie, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern

A. van Mazijk - Technische Universität Delft, Fakultät für zivile Technik, Fachgruppe Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung

3.1. Strukturierung der Flußläufe

Um Unterschiede in der Morphologie des Rheins im Modell berücksichtigen zu können, wurde der Rhein vom Bodensee (Stein am Rhein) bis zum Wehr in Hagestein, sowie seine wichtigsten Nebenflüsse (Aare, Neckar, Main, Mosel) und Verzweigungen (Waal und IJssel) in *Abschnitte* aufgeteilt, welche ihrerseits wiederum in eine Anzahl von *Teilabschnitten* unterteilt sein können (siehe Tabellen 3.1.1, 3.1.2 und Abb. 3.1.1).

Ein Abschnitt ist als Teil des Flusses in Längsrichtung definiert, in dem der Abfluß als konstant vorausgesetzt wird, wobei die Abschnitte so gewählt wurden, daß der pro Abschnitt vorhandene Pegel mit seiner zugehörigen Wasserstands-Abfluß-Beziehung einen für diesen Abschnitt repräsentativen Abfluß liefert. Für die niederländischen Abschnitte wird dabei eine Ausnahme gemacht: Das Stauprogramm S285 bestimmt die Abflüsse der Waal, IJssel und des Lek anhand eines festen Prozentsatzes des Abflusses am Pegel Lobith, welcher über den Wasserstand an diesem Pegel ermittelt wird.

Ein Teilabschnitt ist als ein Teil des Abschnittes definiert, in dem in Längsrichtung die Fließgeschwindigkeit als konstant vorausgesetzt wird. Die mittlere Fließgeschwindigkeit in einem Teilabschnitt wird als die Beziehung zwischen dem aktuellen Abfluß und dem maßgebenden abflußwirksamen Querschnitt dieses Teilabschnittes bestimmt. Sind die Länge L_i eines Teilabschnittes und die aktuelle Fließgeschwindigkeit u_i gegeben, so läßt sich für jeden Wasserstand eine Fließzeit $T_i = L_i/u_i$ berechnen. Das Alarmmodell verwendet Wasserstands-Fließzeit-Tabellen um die Transportzeiten zu ermitteln.

3.2. Hydraulische Berechnungen der Fließzeiten im Hochrhein und in der Aare

Für die notwendigen Eingabedaten des Alarmmodells Rhein wurden in der Schweiz einerseits Modellrechnungen für den Rhein und die Aare und andererseits Tracerexperimente im Rhein zur Verifikation sowohl dieser Ergebnisse als auch zur Kalibrierung des Alarmmodelles durchgeführt. Eine umfassende Beschreibung dieser Tätigkeiten und deren Resultate ist in [LHG 1991] publiziert worden.

Tabelle 3.1.1 Abschnittseinteilung des Rheins und seiner Nebenflüsse

Flußabschnitts-nr.	von Knoten	nach Knoten	von Fluß-kilometer	bis Fluß-kilometer	Wasserstandsmeßstelle	Fluß-km	Länge des Abschnittes [km]	Fluß-km Mündung/Teilung
<u>RHEIN:</u>								
80	130	131	24,7	64,4	Neuhausen-Flurlingen	45,8	39,7	
81	131	1	64,4	103,0	Rekingen	90,7	38,6	
1-6	1	5	103,0	242,5	Rheinfelden	149,6	139,5	
7-16	5	12	242,5	309,1	Kehl-Kronenhof	292,2	66,6	
17	12	13	309,1	351,0	Plittersdorf	340,2	41,9	
18	13	14	351,0	376,0	Maxau	362,3	25,0	
19	14	15	376,0	428,5	Speyer	400,6	52,5	
20	15	16	428,5	496,8	Worms	443,4	68,3	
21	16	17	496,8	529,0	Mainz	498,3	32,2	
22	17	18	529,0	592,5	Kaub	546,2	63,5	
23	18	19	592,5	605,0	Koblenz	593,5	12,5	
24	19	20	605,0	634,0	Andernach	613,8	29,0	
25	20	21	634,0	671,0	Bonn	654,7	37,0	
26	21	22	671,0	716,0	Köln	688,8	45,0	
27	22	23	716,0	762,0	Düsseldorf	744,2	46,0	
28	23	24	762,0	797,0	Ruhrort	780,8	35,0	
29	24	25	797,0	827,0	Wesel	814,0	30,0	
30	25	26	827,0	862,0	Rees	837,4	35,0	
31	26	27	862,0	867,2	Lobith	862,2	5,2	
<u>WAAL:</u>								
32	27	105	867,2	951,8	Tiel	913,0	84,6	867,2
<u>PANNERDENSCH KANAAL:</u>								
33	27	28	867,2	878,5	Pannerden	872,0	11,3	867,2
<u>IJSSEL:</u>								
34	28	29	878,5	994,5	Deventer	945,0	107,1	878,5
<u>LEK:</u>								
35	28	101	878,5	946,5	Hagestein	946,5	66,6	878,5
<u>AARE:</u>								
84	132	133	183,3	215,3	Brügg	185,3	32,0	103,0
83	133	134	215,3	292,4	Murgenthal	239,0	77,1	
82	134	1	292,3	306,5	Stilli	294,0	14,1	
<u>NECKAR:</u>								
36	30	31	180,0	100,0	Gundelsheim (Neckar)	100,1	80,0	428,5
37	31	15	100,0	0,0	Heidelberg	26,0	100,0	
<u>MAIN:</u>								
38	31	33	400,0	200,0	Schweinfurt (Main)	330,0	200,0	496,8
39	33	34	200,0	100,0	Main II	P.M.	100,0	
40	34	16	100,0	0,0	Frankfurt am Main	37,0	100,0	
<u>MOSEL:</u>								
90	140	141	242,5	212,9	Palzem	229,9	29,6	592,5
91	141	142	212,9	123,9	Trier	195,3	89,0	
92	142	18	123,9	0,0	Cochem	52,0	123,9	

¹Der Pegel Koblenz wurde aus programmatischen Gründen fiktiv von Fluß-km. 591,5 nach Fluß-km. 593,5 versetzt, da er als repräsentativ für den Abschnitt 23 betrachtet wird. In seinen Daten wird dem Abfluß der Mosel Rechnung getragen.

Tabelle 3.1.2 Fluß-Teilabschnitte

Fluß	Teilabschnitts-nr.	Anfangs-Flußkm	Länge [km]	Breite [m]	Fluß	Teilabschnitts-nr.	Anfangs-Fluß-km	Länge [km]	Breite [m]
RHEIN	8001	24,7	22,9	100	RHEIN	2703	744,2	17,8	425
	8002	47,6	6,9	100		2801	762,0	18,8	300
	8003	54,5	4,3	100		2802	780,8	16,2	300
	8004	58,8	5,6	100		2901	797,0	17,0	300
	8101	64,4	6,3	150		2902	814,0	13,0	300
	8102	70,7	7,9	150		3001	827,0	24,9	300
	8103	78,6	6,4	150		3002	851,9	10,1	300
	8104	85,0	5,1	150		3101	862,0	5,2	340
	8105	90,1	12,9	150	WAAL	3201	867,2	17,670	260
	101	103,0	5,8	180		3202	884,870	16,505	260
	102	108,8	4,4	180		3203	901,375	11,875	260
	103	113,2	16,1	180		3204	913,250	12,870	260
	104	129,3	6,1	180		3205	926,120	8,660	273
	105	135,4	8,0	180		3206	934,780	10,545	305
	106	143,4	8,7	180		3207	945,325	6,475	337
	107	152,1	11,7	180	PANNERDENSCH	3301	867,2	4,485	135
	108	163,8	6,2	180	KANAAL	3302	871,685	6,815	140
	109	170,0	3,6	180	IJSSEL	3401	878,500	12,160	78
	201	173,6	53,0	170		3402	890,660	8,065	81
	301	173,6	53,0	136		3403	902,785	4,005	81
	401	226,6	7,7	170		3404	907,060	17,700	82
	501	234,3	8,2	170		3405	929,340	15,730	93
	601	234,3	8,2	136		3406	951,890	12,095	97
	701	242,5	5,7	170		3407	963,985	7,925	102
	801	248,2	11,9	170		3408	971,910	15,700	122
	901	248,2	11,9	136		3409	987,610	13,750	148
	1001	260,1	7,4	170	LEK	3501	878,500	4,000	100
	1101	267,5	6,6	170		3502	882,800	8,370	100
	1201	267,5	6,6	136		3503	891,170	8,970	115
	1301	274,1	9,0	170		3504	900,140	7,860	120
	1401	283,1	8,3	170		3505	908,000	4,700	130
	1501	283,1	8,3	136		3506	912,700	5,900	130
	1602	291,4	17,7	170		3507	918,600	3,420	130
	1701	309,1	24,9	170		3508	922,020	5,480	132
	1702	334,0	17,0	170		3509	928,900	10,905	145
	1801	351,0	25,0	315		3510	939,805	6,975	149
	1901	376,0	19,0	315	AARE	8401	183,3	9,5	100
	1902	395,0	16,0	315		8402	192,8	10,4	100
	1903	411,0	17,5	315		8403	203,2	9,1	100
	2001	428,5	15,0	285		8404	212,3	3,0	100
	2002	443,5	21,5	360		8301	215,3	1,8	100
	2003	465,0	15,5	335		8302	217,1	11,7	100
	2004	480,5	16,3	385		8303	228,8	5,4	100
	2101	496,8	21,1	495		8304	234,2	11,7	100
	2102	517,9	11,1	705		8305	245,9	1,1	100
	2201	529,0	17,2	425		8306	247,0	7,4	100
	2202	546,2	11,8	245		8307	254,4	8,4	100
	2203	558,0	12,5	325		8308	262,8	2,4	100
	2204	570,5	10,5	405		8309	265,2	3,4	100
	2205	581,0	11,5	280		8310	268,6	0,8	100
	2301	592,5	12,5	330		8311	269,4	2,1	100
	2401	605,0	9,0	315		8312	271,5	3,6	100
	2402	614,0	20,0	310		8313	275,1	2,4	100
	2501	634,0	13,5	310		8314	277,5	5,2	100
	2502	647,5	12,5	445		8315	282,7	4,9	100
	2503	660,0	11,0	450		8316	287,6	1,4	100
	2601	671,0	17,0	390		8317	289,0	1,4	100
	2602	688,0	14,5	410		8318	290,4	2,0	100
	2603	702,5	13,5	395		8201	292,4	5,6	140
	2701	716,0	20,0	365		8202	298,0	1,7	140
	2702	736,0	8,2	325		8203	299,7	5,5	140

* In diesen Teilabschnitten erfolgten Flußbegradigungen!

** In diesen Teilabschnitten befinden sich wegen Kraftwerken Parallelstrecken mit einer anderen Länge!

Tabelle 3.1.2 Fluß-Teilabschnitte (Fortsetzung)

Fluß	Teilabschnitts-nr.	Anfangs-Fluß-km	Länge [km]	Breite [m]	Fluß	Teilabschnitts-nr.	Anfangs-Fluß-km	Länge [km]	Breite [m]
AARE	8204	305,2	1,3	140	MOSEL	9203	59,4	18,9	110
NECKAR	3601	0,0	80,0	80		9202	78,3	24,7	110
	3701	80,0	100,0	100		9201	103,0	20,9	110
MAIN	3801	0,0	200,0	70	9104	123,7	17,8	120	
	3901	200,0	100,0	100	9103	141,5	25,4	120	
	4001	300,0	100,0	150	9102	166,9	29,0	120	
MOSEL	9206	0,0	20,8	110	9101	195,9	17,0	120	
	9205	20,8	16,3	110	9002	212,9	17,0	115	
	9204	37,1	22,3	110	9001	229,9	12,6	115	

Abb. 3.1.1 Strukturierungsschema der Flußläufe für das Rheinalarmmodell

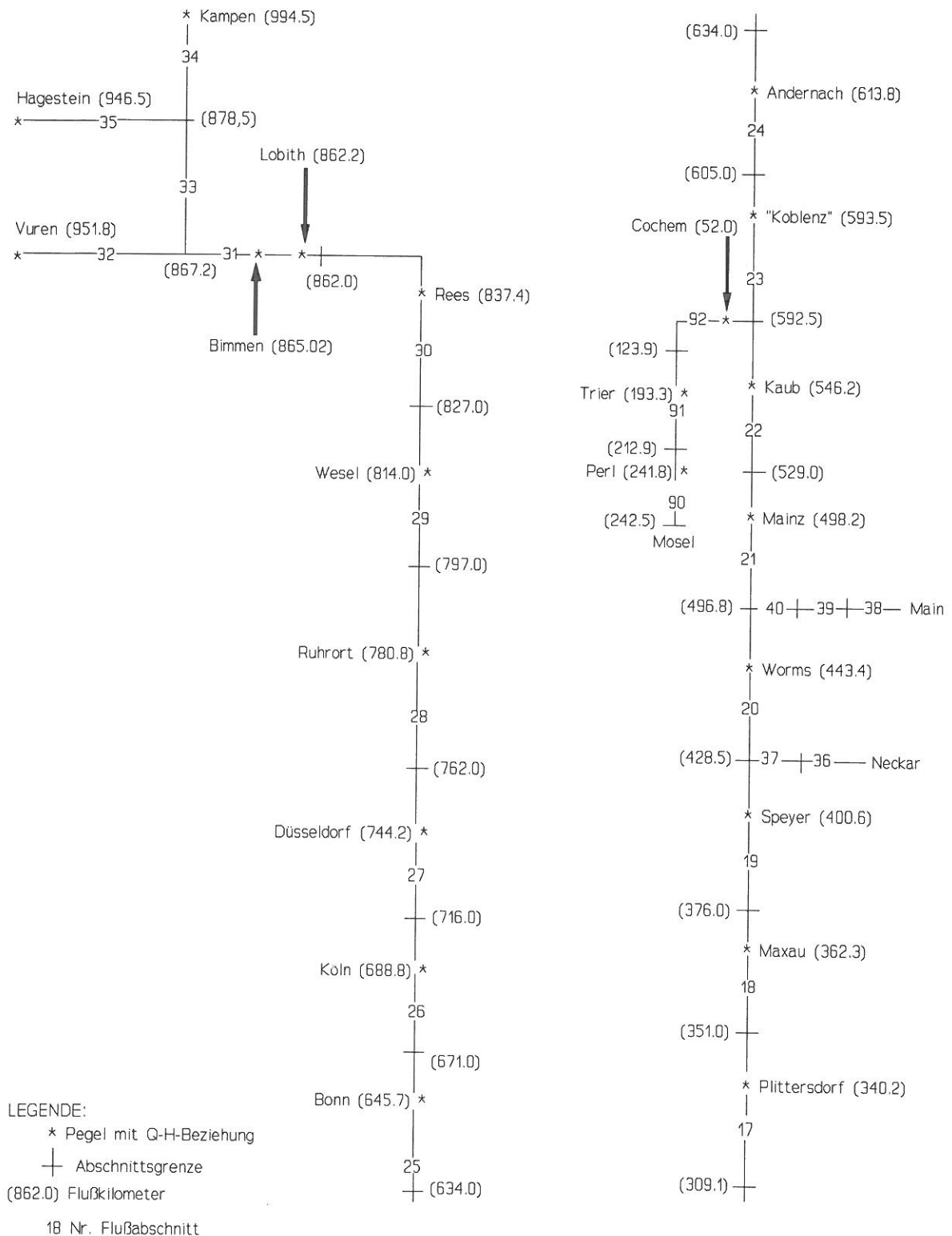
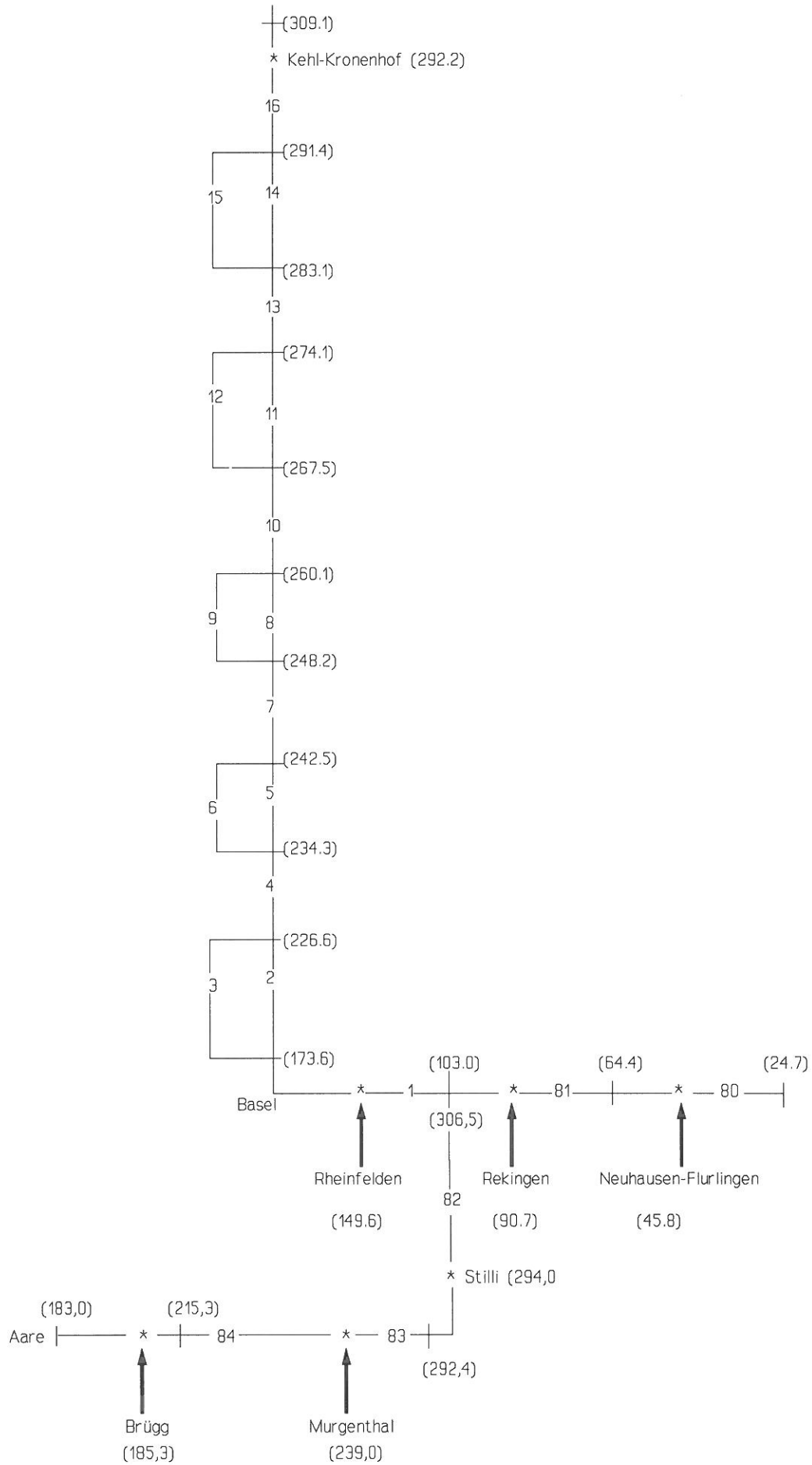


Abb. 3.1.1 Strukturierungsschema der Flußläufe für das Rheinalarmmodell (Fortsetzung)



3.2.1 Abfluß-Wasserstand-Beziehungen

Im Alarmmodell Rhein sind die Q/H-Beziehungen mit folgender Aktualität integriert:

Station	Gültigkeit
Rhein - Neuhausen	ab 01.01.74**
Rhein - Rekingen	ab 01.01.74*
Rhein - Rheinfelden	ab 01.01.89
Aare - Brügg	ab 01.01.90*
Aare - Murgenthal	ab 25.09.90
Aare - Untersiggenthal, Stilli	ab 31.10.90

* Nur gültig mit einer Verkrautungstabelle

** Da die Station Rhein-Neuhausen-Flurlingen gegenwärtig noch nicht über eine Fernmeldeeinrichtung für Wasserstände verfügt, wird der Abfluß an dieser Station mit Hilfe der Werte der Station Rhein-Rekingen und einer Korrelationsrechnung bestimmt.

Die Verkrautungstabellen berücksichtigen die durch Pflanzenwachstum im Gewässerbett verursachten, und somit von der Jahreszeit abhängigen Abweichungen von der Q/H-Beziehung. Die Tabelle, oder Kurve, weist die Differenz vom gemessenen Pegelstand zum in der Umrechnung zu berücksichtigenden Wert auf. Für die Station Rekingen gilt seit 1974 immer die gleiche Grundkurve als Q/H-Beziehung. Sämtliche Abweichungen davon werden in die jährlichen Verkrautungskurven einbezogen. Für das Alarmmodell wurden deswegen durch Medianbildung der Verkrautungskurven der Jahre 1980 bis 1989 monatliche Pegelkorrekturwerte ermittelt (Abb. 3.2.1).

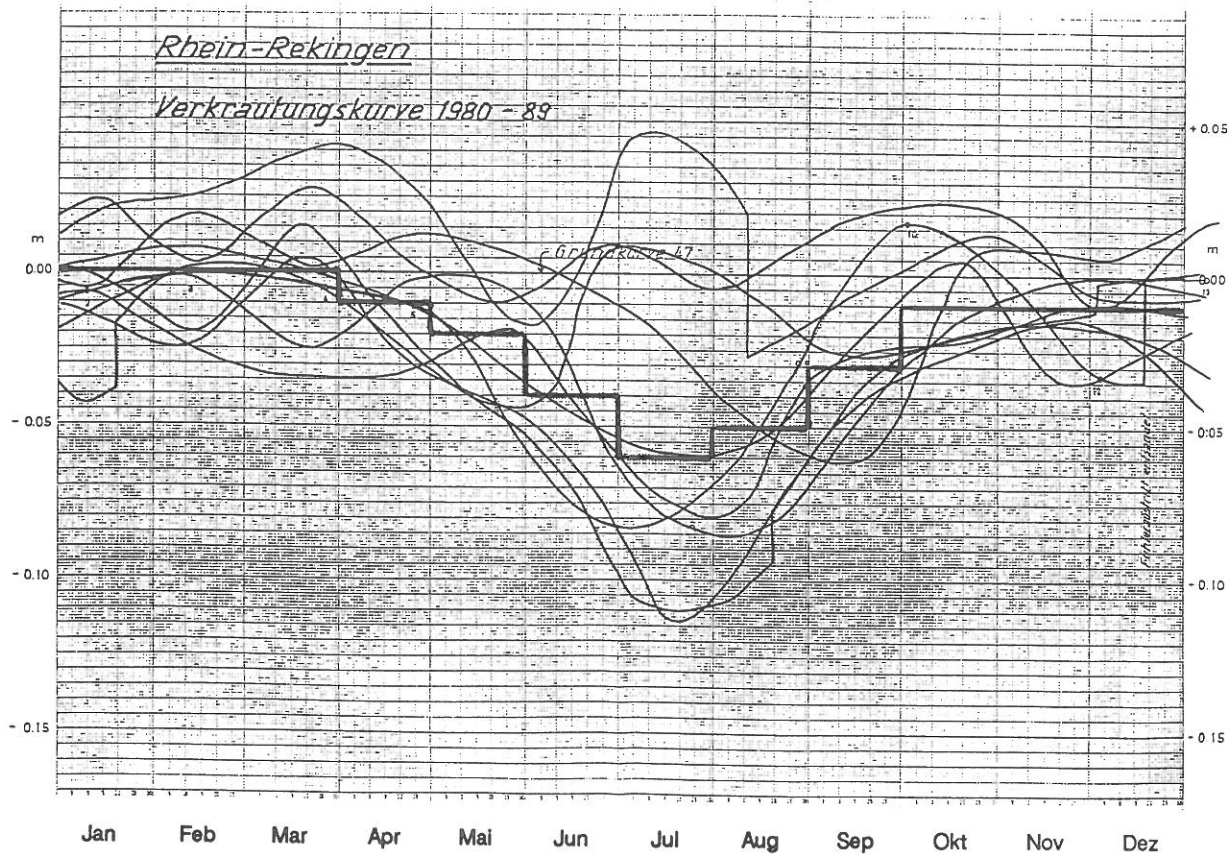


Abb. 3.2.1 Verkrautungskurven der Jahre 1980 bis 1989 für die Station Rekingen. Abweichungen von der Q/H-Grundkurve und im Alarmmodell berücksichtigte monatliche Werte.

Im Juli, dem Monat mit den größten Unterschieden in den jährlichen Verkrautungskurven, ergibt eine Wasserstands Differenz von 6cm, bezogen auf ein mittleres Q, eine Abweichung in der Abflußmenge von knapp 4%. Durch die Verkrautung können in Ausnahmejahren Pegelabweichungen bezüglich der Grundkurve der Q/H-Beziehung bis maximal 20 cm, entsprechend rund 12% bei der Abflußmenge, vorkommen. Stationen mit Verkrautungstabellen besitzen somit eine Fehlerquelle, die im Verlauf der Zeit unterschiedlich groß sein kann.

Stabilere Q/H-Beziehungen existieren dagegen an den Stationen Murgenthal mit rund 5% und Rheinfeldern mit rund 2% Abweichung zwischen verschiedenen Q/H-Kurven der letzten Jahre.

3.2.2 Fließzeitenberechnungsprogramm FLORIS

Die Fließzeitberechnungen im schweizerischen Rheinabschnitt wurden mit dem hydrodynamischen Modell FLORIS der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich durchgeführt. Dabei werden stationäre und instationäre eindimensionale Abflüsse in Flußsystemen mit Hilfe der Kontinuitäts- (3.2.1) und der Impulsgleichung (3.2.2) von De Saint Venant mit einem Differenzenverfahren berechnet [VAW, 1990a].

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (3.2.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial a}{\partial x} + g \cdot J = 0 \quad (3.2.2)$$

wobei: g :Erdbeschleunigung
a :Gewässertiefe
x :Weglänge
t :Zeit
u :Fließgeschwindigkeit
A :Querschnittsfläche
J :Gefälle
Q :Abfluß

Das Flußsystem wird zur Berechnung in verschiedene Abschnitte, sogenannte Flußarme (diese Abschnitte müssen nicht unbedingt mit den im Alarmmodell integrierten Abschnitten übereinstimmen), unterteilt (Abb. 3.2.2). Abschnittsgrenzen, im Modell Knoten genannt, bilden Flußstellen, die mit den obigen Gleichungen nicht berechnet werden können, wie z.B. Zusammenflüsse oder Kraftwerksanlagen. Die speziellen Berechnungen, die für solche Stellen nötig sind, werden im Modell mit den einzelnen Abschnittsberechnungen verknüpft.

Zur Berücksichtigung der Flußgeometrie sind entsprechende Querprofile im Programm integriert. Mit Hilfe der Querprofilaten und dem Wasserstand wird die durchströmte Fläche und die über den Querschnitt gemittelte Geschwindigkeit für jedes Querprofil berechnet. Durch Integration zwischen den Querprofilen erhält man die Abschnittsfließzeiten und durch deren Aufsummierung die Gesamtfließzeit zwischen zwei Stellen im Flußlauf.

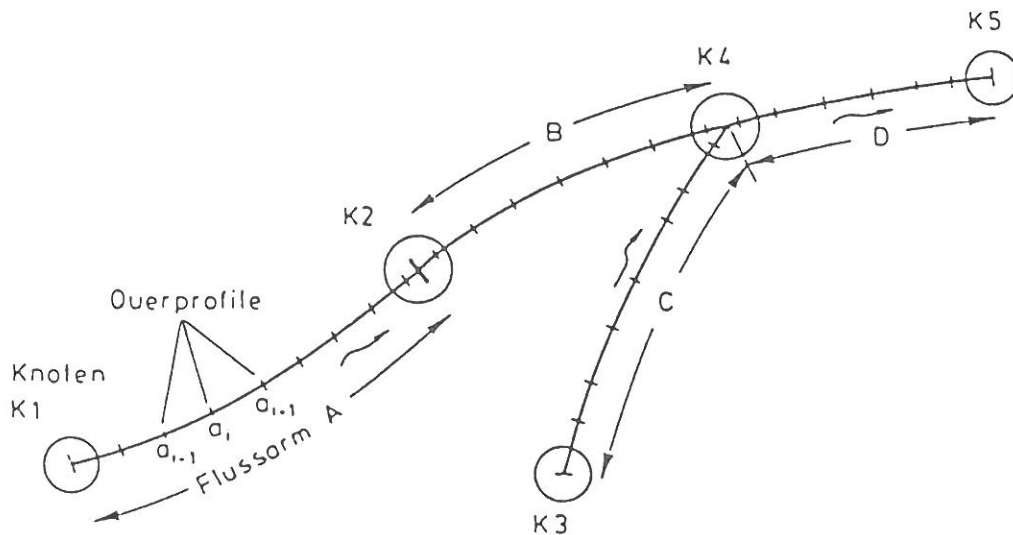


Abb. 3.2.2 Knoten, Flußarme und Querprofile als Grundelemente, mit denen ein Flußgebiet im Modell FLORIS beschrieben wird [aus: VAW, 1990].

3.2.3 Durchgeführte Berechnungen und deren Wertung

Zur Berechnung der Fließzeiten im Rhein vom Bodensee bis nach Basel wurden zwei Hauptabschnitte (unterteilt in viele Teilabschnitte) gebildet. Der obere erstreckt sich vom Rhein-km 24,680 (Stein am Rhein) bis km 103,000 (Aaremündung), der untere von km 103,000 bis km 173,600 (Stauwehr Kembs). Maßgebend für die Abflüßmengen im oberen Abschnitt ist die Station Rekingen, im unteren die Station Rheinfelden.

Das Längsprofil des oberen Hauptabschnittes (Abb. 3.2.3) weist deutlich darauf hin, wo einzelne Knoten und Flussarme im Modell (Abb. 3.2.4) definiert werden müssen.

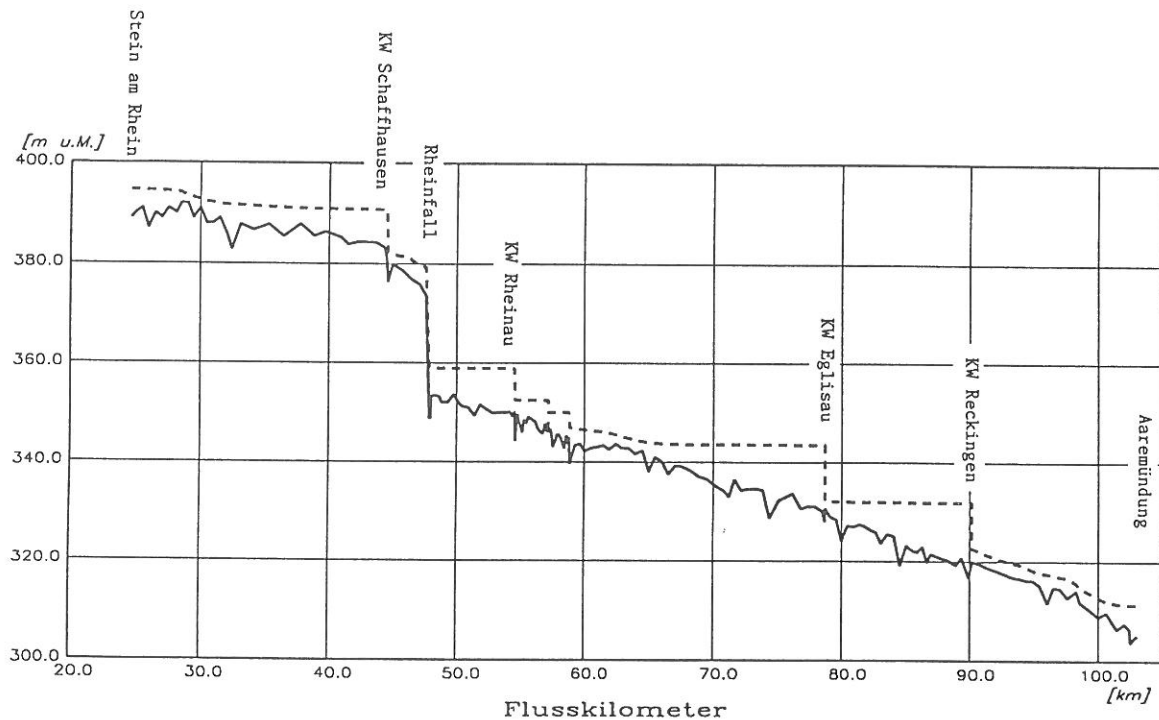


Abb. 3.2.3 Längsprofil des Rheins im oberen Hauptabschnitt

— — — — — Flußsohle
 - - - - - stationärer Wasserspiegel, $Q_{Rekingen} = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ [aus: VAW 1990]

Insgesamt sind zwischen Stein am Rhein und dem Stauwehr Kembs 373 Querprofile in 27 Teilabschnitten definiert.

Berechnet wurden die Fließzeiten für Abflüsse von 200 bis 1 800 m³/s bei Rekingen respektive von 400 bis 4 000 m³/s bei Rheinfelden [VAW 1990, LHG 1991]. Die Teilergebnisse in Abb. 3.2.5 weisen deutlich auf die Beeinflussung der Fließzeiten durch die Staustufen hin.

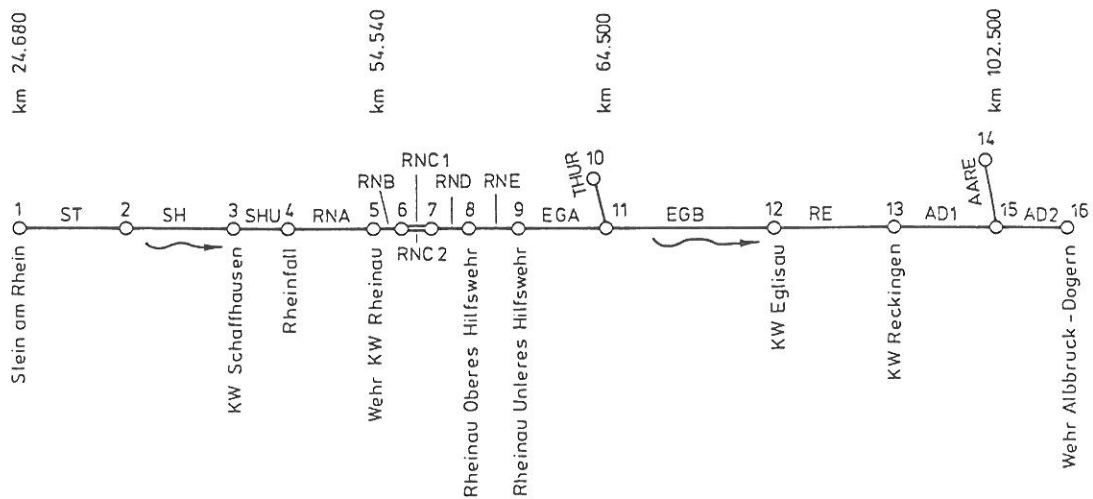


Abb. 3.2.4 Netzwerk für die Modellierung des oberen Hauptabschnittes [aus: VAW 1990]

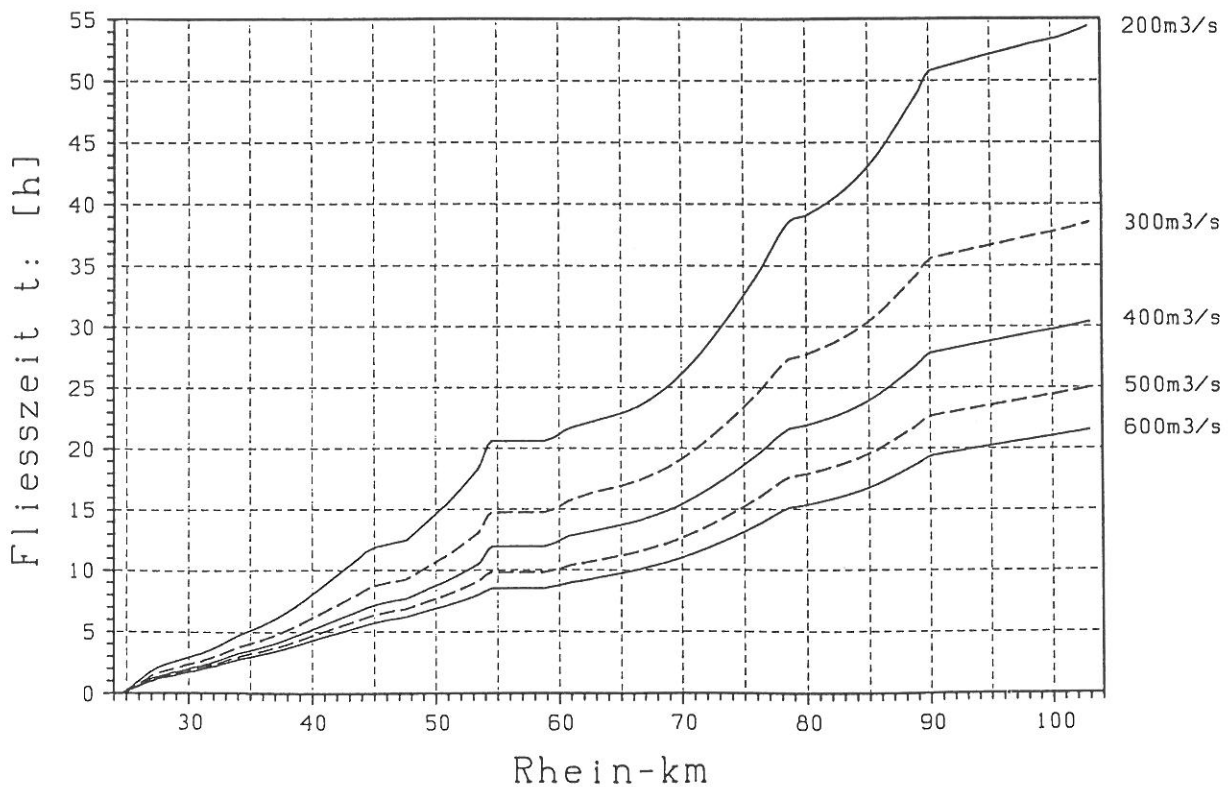


Abb. 3.2.5 Mittlere Fließzeiten im oberen Hauptabschnitt des Rheins, Stein am Rhein (km 24,68) bis Aaremündung (km 103,00); Abfluß bei Rekingen: 200 - 600 m³/s [aus: VAW 1990].

Die Aare wurde für die analoge Berechnung vom Bielersee bis zur Mündung in den Rhein in 3 Hauptabschnitte aufgeteilt: 1. vom Wehr Port (Aare-km 183,32) bis zur Emmemündung (km 215,15), mit der Abflußmeßstation Brügg als Referenzstation, 2. von der Emmemündung bis zur Limmatmündung (km 292,43), Abflußmeßstation Murgenthal und 3. von der Limmatmündung bis zur Mündung in den Rhein (km 306,52), Abflußmeßstation Untersiggenthal-Stilli [VAW 1992].

Im Gegensatz zu den Querprofilaten des Rheins sind diejenigen der Aare lückenhaft und zum Teil von älterem Datum. Die Berechnung der Fließzeiten in der Aare wird zusätzlich erschwert durch sieben Parallelstrecken, gegenüber deren zwei im Rhein, bei Kraftwerksanlagen. Das Wasser fließt einerseits durch die Kraftwerksturbinen und andererseits durch die Restwasserstrecke [Margot et al., 1992].

Dazu gibt es an den Kraftwerken im Prinzip jeweils zwei Fließwege: durch den Kraftwerkskanal und über den natürlichen Aareflußlauf. Da der Einbau der diesbezüglichen Parallelstrecken programmtechnisch zu aufwendig war, sind in Abhängigkeit der Abflüsse an den repräsentativen Pegelstationen nur die jeweiligen kürzesten Fließzeiten in das Modell eingegeben worden. Als maßgebender Fließweg wurde der natürliche Aareflußlauf in Betracht gezogen.

Der Vergleich der Resultate aus den FLORIS-Modellrechnungen für den Rhein [VAW 1990] und aus den in den Jahren 1988 und 1989 durchgeführten Tracerversuchen [Leibundgut et al. 1988, Petermann et al. 1989] fällt sehr gut aus. Die Differenz beträgt im ersten Versuch über 50 km 33 Minuten (2,3%) und im zweiten über 105 km 41 Min (2,1%). In keinem Teilabschnitt ist der Unterschied größer als 20 Min, wovon rund die Hälfte auf methodische Ungenauigkeiten (Wahl des Probenahmeortes, Berechnung der mittleren Fließgeschwindigkeit, zeitliche Auflösung der Tracererfassung) zurückzuführen sein können [LHG 1991].

Die Berechnungsergebnisse für die Aare konnten bisher nicht verifiziert werden, da noch kein Tracerversuch stattfand.

3.2.4 Zukunftsperspektiven

Flußbettveränderungen durch Erosion und Sedimentation in den behandelten Abschnitten des Rheins und der Aare sind für das Berechnungsmodell vernachlässigbar. Dies zum Teil auch, weil die Geschiebefrachten der Zuflüsse bevor sie in den Rhein gelangen in Geschiebesammlern, in der Thur und der Töss [Jakob & Geissel 1992], oder natürlicherweise, in der Emme, abgelagert werden. An solchen Stellen finden periodische Ausbaggerungen statt.

Größere Veränderungen im Flußbett, die auch entsprechende Auswirkungen auf die Fließzeiten haben können, sind anthropogen bedingt. Baggerungen im großem Umfang, Neu- oder Umbau von Kraftwerksanlagen sind zurzeit im Gang oder noch geplant. Nach mehreren solchen Einzelereignissen wäre es sicher angebracht, die Modellberechnungen zu aktualisieren und falls nötig die Resultate im Alarmmodell Rhein zu berücksichtigen.

Eine Überprüfung der Berechnung für die Aare könnte sich ergeben, falls die Datengrundlage durch neue Querprofilaufnahmen verbessert würde. Eine Verifikation der Ergebnisse mit Hilfe eines Tracerversuchs ist vorgesehen, zum jetzigen Zeitpunkt jedoch noch nicht definitiv festgelegt.

3.2.5 Literatur

Jakob, A. & A. Geissel (1992): Meßnetze chemischer und physikalischer Parameter. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 7.1, Landeshydrologie und -geologie, Bern.

Leibundgut, Ch., J. Petermann und B. Schudel (1988): Markierversuch Rhein »Albbruck-Basel«, Beschaffung von Eingabedaten für ein Alarm- und Stofftransportmodell mittels Traceruntersuchungen. Bericht des Geographischen Instituts der Uni Bern, Abt. Physikalische Geographie und der Firma Naturaqua, Bern, 30 S.

- LHG (1991) - Kühne, A., Ch. Leibundgut, J. Petermann, B. Schädler, B. Schudel, G. Schneider und M. Spreafico (1991): Fließzeitbestimmung und Stofftransportuntersuchungen im Rhein. Mitteilung der Landeshydrologie und -geologie Nr. 13, 136 S, Bern.
- Margot, A., B. Schädler, R. Sigg und R. Weingartner (1992): Beeinflussung der Fließgewässer durch Kraftwerke und Seen. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.3, Landeshydrologie und -geologie, Bern.
- Petermann, J., B. Schudel, Ch. Leibundgut, M. Gossauer und D. Morgenthaler (1989): Markierversuch Rhein »Rheinau-Basel«, Beschaffung von Eingabedaten für ein Alarm- und Stofftransportmodell mittels Traceruntersuchungen. Bericht des Geographischen Instituts der Uni Bern, Abt. Physikalische Geographie und der Firma Naturaqua, Bern, 31 S.
- VAW (1990a): Fließzeiten im Rhein. Berechnung von mittleren Abflußgeschwindigkeiten und Fließzeiten mit dem hydrodynamischen Modell FLORIS. Bericht Nr. 767 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zürich, 96 S.
- VAW (1992): Fließzeiten in der Aare. Berechnung von mittleren Abflußgeschwindigkeiten und Fließzeiten mit dem hydrodynamischen Modell FLORIS. Bericht Nr. 788 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zürich, 66 S.

3.3 Die Fließzeiten in Ober-, Mittel und Niederrhein, sowie in der Mosel

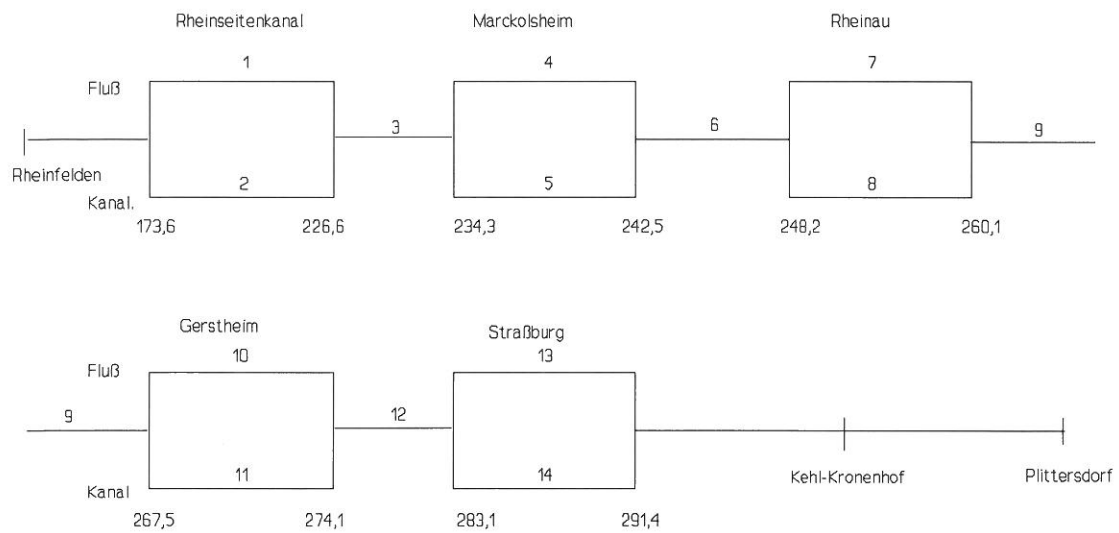
Zwischen Village-Neuf/Kembs (Oberrhein, Fluß-km 173,6) und Plittersdorf (Oberrhein, Fluß-km 349,2) ist der Rhein zu einem großen Teil mit Parallelkanälen versehen. Das Verhältnis des Abflusses in den Kanälen, welche sich auf französischem Hoheitsgebiet befinden, und dem Abfluß im »Restrhein« wurde mittels eines Abkommens zwischen der Bundesrepublik Deutschland und Frankreich festgelegt. Dieses Abkommen besagt, daß durch die Kanalstrecken maximal 1400 m³/s und durch den »Restrhein« minimal 30 m³/s geleitet werden sollen. Das Abflußverhältnis mit dem das Alarmmodell rechnet, wird durch den Abfluß am Pegel Rheinfelden bestimmt. Die Regulierung erfolgt basierend auf den Abflüssen an der Station Rheinfelden.

Bei der Anwendung des Alarmmodells für den Rhein muß damit gerechnet werden, daß das erwähnte Maximum von 1400 m³/s in der Praxis des öfteren überschritten wird. Zudem erfolgt die Abflußsteuerung bis ca. 1400 m³/s, in Abhängigkeit der Energie-Erzeugung durch die Electricité de France (EDF), in der Regel im sogenannten Schwellbetrieb. Dies bedeutet, daß bis zu einem Abfluß von etwa 1200 m³/s das Wasser nachts gestaut und tagsüber, zu Zeiten größeren Energiebedarfs, abgelassen wird. Es handelt sich dann nicht um einen konstanten Abfluß und dementsprechend nicht um eine konstante Fließzeit über diese gestaute Flußstrecke bzw. Kanal.

Die Wasserstandsermittlung für den Pegel Kehl-Kronenhof erfolgt im Alarmmodell über Bezugslinien zum Wasserstand des Pegels Rheinfelden (siehe Abb. 3.3.1).

Für die ungestaute Rheinstrecke Iffezheim-Emmerich/Lobith bestehen 14 Abflußmeßstellen und für die Nebenflüsse Neckar, Main und Mosel noch 5 zusätzliche. In der Tabelle 3.3.1 werden diese Stellen aufgezählt, einschließlich der Aktualität ihrer Q/H-Beziehungen.

Auf Grund von Fließgeschwindigkeitsmessungen wurden Beziehungen zwischen Wasserstand und mittlerer Fließgeschwindigkeit entwickelt. Diese Beziehungen bilden die Grundlage für die Fließzeitermittlungen. Die Genauigkeit von Fließzeitberechnungen wurde durch präzisere Berücksichtigung der Flußgeometrie zwischen den Durchflußmeßstellen gesteigert. Hierzu sind Wasserspiegellagenberechnungen genutzt worden, die gemessene Flußprofile (am Rhein alle 500 m, an der Mosel alle 300 m) zur Grundlage haben.



Abflußverteilung

Rheinseitenkanal	$QRF \leq 1400 : QF = 30, QK = QRF$ $QRF > 1400 : QK = 1400, QF = QRF - 1370$
Marckolsheim	$QRF \leq 1395 : QF = 30, QK = QRF + 5$ $QRF > 1395 : QK = 1400, QF = QRF - 1365$
Rheinau	$QKK \leq 1475 : QF = 30, QK = QKK - 75$ $QKK > 1475 : QK = 1400, QF = QKK - 1445$
Gerstheim	$QKK \leq 1455 : QF = 30, QK = QKK - 55$ $QKK > 1455 : QK = 1400, QF = QKK - 1425$
Straßburg	$QKK \leq 1430 : QF = 30, QK = QKK - 30$ $QKK > 1430 : QK = 1400, QF = QKK - 1400$

QRF = Abfluß in Rheinfelden

QKK = Abfluß in Kehl-Kronenhof

QF = Abfluß im Fluß, QK = Abfluß im Kanal

Abb. 3.3.1 Schematische Darstellung des staugeregelten Oberrheins

Tabelle 3.3.1 Abflußmeßstellen

Station	Gültigkeit der z.Zt. verwendeten Q/H-Beziehungen
Plittersdorf	seit 01.02.77
Maxau	01.09.85
Speyer	01.09.85
Worms	01.11.86
Mainz	01.11.86
Kaub	01.11.86
Koblenz	01.11.86
Andernach	01.11.86
Bonn	01.07.86
Köln	01.07.86
Düsseldorf	01.07.86
Ruhrort	01.07.86
Wesel	01.07.86
Rees	01.11.84
Gundelsheim (Neckar)	01.11.84
Obernau (Main)	01.05.83
Perl (Mosel)	01.11.82
Trier (Mosel)	01.11.82
Cochem (Mosel)	01.11.82

Die mittleren Fließgeschwindigkeiten errechnen sich aus bekanntem Q und A über die Kontinuitätsbedingung

$$Q = u \cdot A$$

Für u wurde der Ansatz

$$u = k_{st} \cdot r_h^{2/3} \cdot J^{1/2}$$

nach Manning-Strickler mit r_h als hydraulischer Radius gewählt, wobei der Rauheitsbeiwert k_{st} innerhalb hydraulisch sinnvoller Grenzen abschnittsweise variiert und pro Querprofil nach drei Flächenbereichen (Vorland links und rechts sowie Hauptöffnung) unterschieden wurde. Profilanteile, die in Bühnenfelder reichen, wurden als nicht abflußwirksam ausgeschaltet. Zur Ermittlung von Fließzeiten in Abhängigkeit vom Wasserstand sind mehrere hydraulisch gleichartige Abschnitte zusammengefaßt. Für diese größeren Abschnitte wurden punktuell für die Wasserstände durchgeführter Wasserspiegelberechnungen die Fließzeiten T_i berechnet. Durch Verbinden der so erhaltenen Punkte mit einer ausgleichenden Linie ergab sich schließlich die Funktion $T_i = f(W)$ für den jeweiligen Abschnitt.

Die vorgenannten Ermittlungen konnten am Rhein auch für die gestauten Bereiche zwischen Kembs und Iffezheim sowie für die deutsche Moselstrecke durchgeführt werden. Sie liefern allerdings nur mittlere Fließzeiten (keine Laufzeiten oberflächennaher Wasserkörper).

Die durchgeführten Wasserspiegellagenberechnungen und somit auch die daraus ermittelten Fließzeiten setzen u.a. stationäre, abschnittsweise gleichförmige Abflußverhältnisse voraus. Diese sind jedoch selten anzutreffen; in der Regel muß von instationären Verhältnissen ausgegangen werden. Durch Wahl möglichst kurzer Abschnittslängen sind jedoch innerhalb eines Abschnittes jeweils »quasi«-stationäre Zustände gegeben. Viele Bezugspegel und damit kleine Strecken, für die der Wasserstand eines Pegels maßgebend ist, bieten zudem die Möglichkeit, Fließzeiten auch bei instationären Verhältnissen - steigende und/oder fallende Wasserstände - zu berechnen.

Die Mosel ist durch eine Folge von Staustufen charakterisiert. Die Fließzeit- und Abfließberechnungen aufgrund von Wasserständen sind nicht immer durchführbar, da eine eindeutige Beziehung zwischen Wasserstand und Abfluß oft nicht vorliegt. Deshalb stützt sich die Vorhersage im Modell auf ausgesuchte aktuelle Abflüsse ab.

Die Nebenflüsse Neckar und Main sind nur provisorisch eingebaut, da noch keine detaillierten Fließzeitberechnungen vorliegen.

Literatur

Adler, M. (1990): Fließzeiten in der Mosel aus Wasserspiegellagenberechnungen. Bericht BfG-0532, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

Engel, H., T. Menzel und K. Wander (1988): Fließzeiten im Rhein aus Wasserspiegellagenberechnungen. Bericht BfG-0429, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, 19 S. und 15 Anlagen

Teuber, W, und K. Wander (1987): Fließzeiten im Rhein aus Flügelmessungen. Bericht BfG-0392, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, 32 S.

3.4. Die Fließzeiten in den niederländischen Rheinzeigen

Die Abflüsse der niederländischen Rheinzeige Waal, Nederrijn-Lek und IJssel werden anhand definierter Beziehungen auf Grundlage des am Pegel Lobith gemessenen Abflusses ermittelt (siehe Abb. 3.4.1). Demzufolge ist beispielsweise bei einem Abfluß von 2000 m³/s in Lobith mit einer Abflußmenge von 300 m³/s in der IJssel, von 320 m³/s im Nederrijn und 1380 m³/s in der Waal zu rechnen. Dies wird mithilfe eines Stauprogramms für die Wehre bei Driel, Amerongen und Hagestein erreicht. Das Ziel ist, einen Mindestabfluß in der IJssel zu gewährleisten, während im Niederrhein ein Abfluß von 25 m³/s beibehalten wird (Abb. 3.4.1).

Die Fließzeitberechnungen wurden mit dem ein-dimensionalen hydrodynamischen Modell ZWENDL des Rijkswaterstaat durchgeführt. Dieses Modell ist direkt vergleichbar hinsichtlich des Modellaufbaus und der benutzten Gleichungen (siehe Gl. 3.2.1 und 3.2.2) mit dem Modell FLORIS der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH, Zürich.

Die im Rheinalarmmodell benutzten Daten entsprechen dem Stand vom 1.7.1990.

Bei der Bewertung dieser Daten sollte man bedenken, daß die bei Niedrigwasser vorgeschriebenen Abflüsse für den Nederrijn und die IJssel nicht immer eingehalten werden, da die Steuerung der Wehre nicht anhand von Abflußmessungen, sondern über die Messung von Wasserständen stattfindet. Bei bestimmten Abflußverhältnissen führt dies zu erheblichen Fließzeitdifferenzen [Van Mazijk et al. 1992]. Für Niedrigwasser (Abfluß Lobith < 1400 m³/s) sollte daher nicht nur der Abfluß am Pegel Lobith in Betracht gezogen werden, sondern es sollten auch die Wasserstände zwischen Arnheim und Hagestein, samt den täglich gemessenen Abflüssen an den Wehren Driel, Amerongen und Hagestein einbezogen werden; ebenso die Abflüsse in der IJssel bei Deventer und Kampen.

Literatur

Mazijk, A. van, S. Wuijts und H.Th. Reitsma (1992): Verbesserung der Fließzeitbestimmung auf der Rheinstraße Lobith-Hagestein (in niederländischer Sprache). Arbeitsgruppe Vorhersage der Qualität des Rheinwassers der Arbeitsgemeinschaft der Rhein- und Maaswasserwerke (RIWA). Sekretariat der RIWA, Postfach 8169, NL 1005 AD Amsterdam, Juni 1992

Valk, H.W.J. van der (1989): Evaluierung des Vorhersagemodells FLOOD für den Rhein am Pegel Lobith (in niederländischer Sprache). DBW/RIZA Arbeitsdokument Nr. 89.013X. Rijkswaterstaat, Dienst für Binnengewässer/RIZA, Lelystad

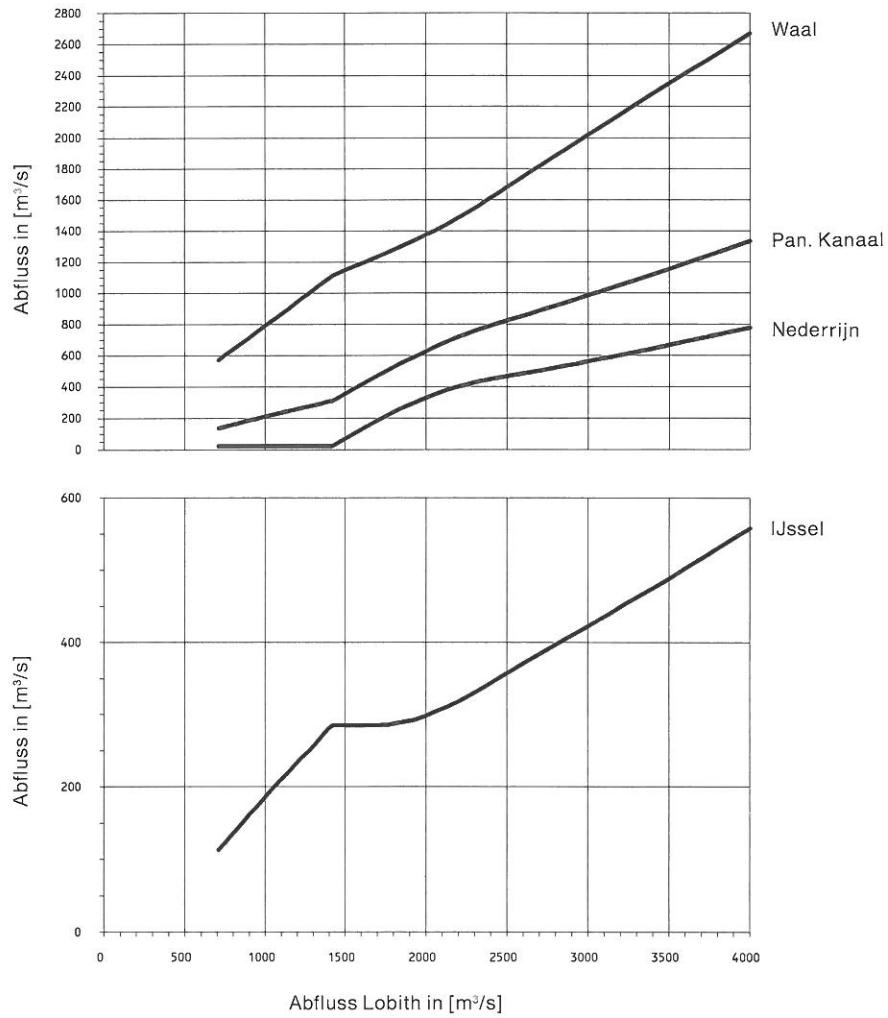


Abb. 3.4.1 Festlegung der Abflüsse in den Rheinseitenarmen als Beziehung zum Abfluß am Pegel Lobith

4. BESCHAFFUNG VON EINGABEDATEN MITTELS TRACERVERSUCHEN

H. Wiesner & Ch. Leibundgut, Professur für Hydrologie - Universität Freiburg i.Br.

H. Hanisch, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

4.1 Einleitung und Methodik

4.1.1 Einleitung

Im vorliegenden Kapitel werden die zwischen 1988 und 1991 mit fluoreszierenden Markierstoffen im Rhein realisierten Tracerversuche beschrieben, deren Auswertung der Ermittlung von Eingabeparametern für das Rheinalarmmodell dient. Nach einer allgemeinen Einführung zur Durchführung und Auswertung von Markierversuchen erfolgt die Vorstellung der wichtigsten Resultate. Zusammengefaßt in Blöcken der Nationen, welche die Tracereexperimente durchführten, werden die wichtigsten Ergebnisse in tabellarischer und graphischer Form dargestellt. Die Schwerpunkte bilden dabei die abschnittsweise vorgenommenen Berechnungen der mittleren Stofftransportgeschwindigkeiten sowie die Ermittlungen der Tracerfrachten. Für die Kalibrierung und Verifikation des Alarmmodells wurden umfangreiche Markierversuche mit Fluoreszenztracern durchgeführt.

Tracereexperimente mit momentanen Einleitungen oder der Einspeisung einer Markiersubstanz über einen bestimmten Zeitraum ermöglichen auf ungefährliche Weise die Simulation von Störfällen durch unkontrollierte Schadstoffeinleitungen in Gewässer. Solche Versuche erlauben einen direkten Einblick in die Bewegungs-, Verteilungs- und Ausbreitungsvorgänge des markierten Grund- oder Oberflächenwassers. Markierversuche in Oberflächengewässern finden in Seen, in Flüssen aber auch in küstennahen Gewässern Anwendung. Häufige Fragestellungen sind die Untersuchung von Strömungsdynamiken, Einschichtungen von Flußwasser oder die Erkundung natürlicher und künstlicher subaquatischer Zu- und Abflüsse. In Fließgewässern wird die Tracermethodik seit etwa zehn Jahren verstärkt eingesetzt und gewann dort, auch durch die verbesserten technischen Möglichkeiten zur in situ-Messung, ein vielfältigeres Anwendungsfeld. Da über quantitativ ausgewertete Versuche mit vergleichbar langen Fließdistanzen großer Flüsse bisher nur wenig veröffentlicht wurde, kommt den zwischen 1988 und 1991 im Rhein durchgeführten Feldexperimenten zum Teil auch Pilotcharakter zu.

Neben kontinuierlichen Verunreinigungen aus anliegenden Ballungsräumen und Industriezentren ist das Rheinwasser durch kurzfristige, katastrophenartige Belastungen gefährdet. Mit den Erfahrungen aus solchen Unglücken der letzten Jahre ging die Expertengruppe der IKSR/KHR bei der Entwicklung des Alarmmodells für den Rhein davon aus, daß die größte Gefährdung für den Lebensraum Rhein und die stromabwärts gelegenen Rheinwassernutzer nach einer unfallbedingten Einleitung von wasserlöslichen Stoffen zu erwarten ist.

Der Transport von in Flußwasser gelösten Stoffen wird in erster Linie durch die Strömung bestimmt, welche sie mit der mittleren Fließgeschwindigkeit des Flusses transportiert (Konvektion). Infolge von Diffusion, Turbulenzen und innerhalb des Flußquerschnittes auftretender Geschwindigkeitsunterschiede kommt es zusätzlich zu Durchmischungen. Desweiteren erfolgt durch entlang der Sohle und der Ufer eines Flusses zufällig verteilte natürliche und anthropogen bedingte Stillwasserzonen, z. B. Bühnenfelder, Stauräume und Verkrautungen, ein verzögerter Transport von Stofffraktionen. Bei diesen dynamisch ablaufenden und gesamthaft als Dispersion bezeichneten Prozessen, werden gleichmäßige Konzentrationsverteilungen eines Stoffes über die Tiefe und Breite des Flusses nach relativ kurzen Distanzen erzielt, wogegen sich der Prozeß der longitudinalen Dispersion weiterhin fortsetzt.

Da es sich bei dem Alarmmodell für den Rhein um ein eindimensionales Stoffausbreitungsmodell handelt, wurden auch die Meßanordnungen der Tracerversuche danach ausgerichtet. Diesem Sachverhalt tragen die folgenden Meßergebnisse der für die Kalibrierung und Verifikation des Rheinalarmmodells herangezogenen Markierversuche Rechnung. Aus der Vielzahl der in den Versuchen gewonnenen Informationen werden in diesem Kapitel neben den Tracerfrachten die abschnittsweise berechneten mittleren Stofftransportgeschwindigkeiten dargestellt, welche neben dem in Kapitel 5 beschriebenen longitudinalen Dispersionskoeffizienten die wichtigsten Größe der eindimensionalen Stoffausbreitung ist. Für Detailinformationen und Datenreihen sei auf die einzelnen Markierversuchsberichte sowie die jeweiligen Abhandlungen zu den Kalibrierungen und Verifikationen verwiesen.

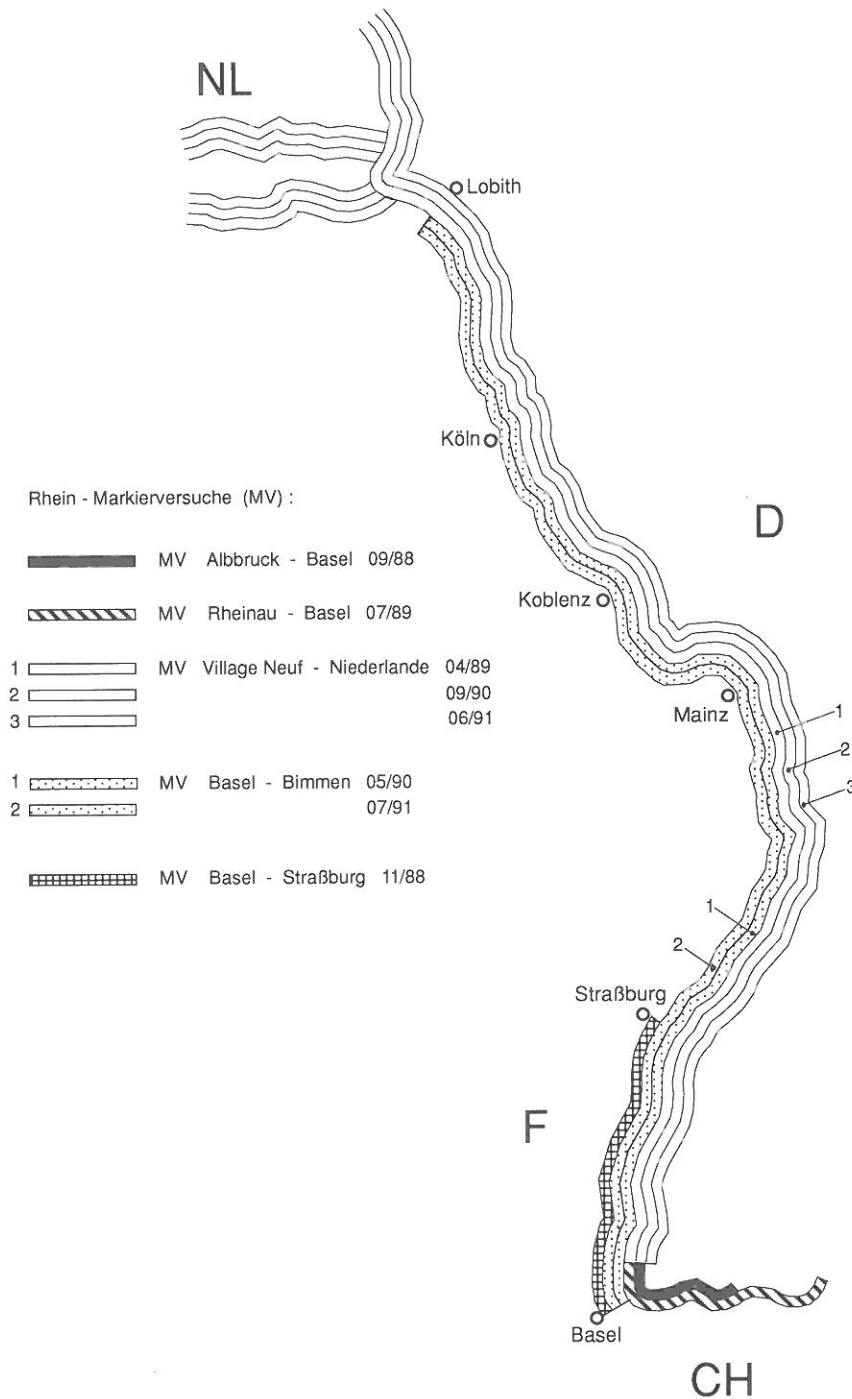


Abb. 4.1.1 Rheinmarkierversuche 1988 - 1991

4.1.2 Tracerversuche und Rheinalarmmodell

Die Fertigstellung der Version 2.0 des Rheinalarmmodells mit dem Einbau einer Proportionalitätskonstanten α und des Stillwasserzonenparameters β (siehe Kapitel 5) erlaubte erstmals eine Eichung für alle Teilabschnitte, in welche der Rhein für die Berechnungen mit dem Alarmmodell unterteilt wurde. Zur Ermittlung der Eingabedaten in Form von Tracerdurchgangskurven für das Rheinalarmmodell und für das zur Auswertung von Markierversuchen entwickelte Stoffausbreitungsmodell für Fließgewässer »SAMF« [Bremicker 1989] der Universität Freiburg, waren umfangreiche Naturversuche notwendig, bei denen mit fluoreszierenden Tracerfarbstoffen unfallbedingte Schadstoffeinleitungen simuliert wurden. Eine erste Vorermittlung der α - und β -Parameter erfolgte daher für den Hochrhein anhand der schweizerischen Berechnungsergebnisse und für die anschließende

Rheinstrecke anhand der mit »SAMF« abschnittsweise berechneten mittleren Stofftransportgeschwindigkeiten und longitudinalen Dispersionskoeffizienten.

Für die Kalibrierung und Verifikation des Rheinalarmmodells konnten die Daten von insgesamt acht zwischen 1988 und 1991 durchgeführten Markierversuchen herangezogen werden (s. Abb. 4.1.1.). Während die schweizerischen und deutsch-niederländischen Markierversuche speziell für die Beschaffung von Eingabedaten für das Rheinalarmmodell durchgeführt wurden, standen die französischen Markierversuche (MV 11/88, MV 05/90, MV 07/91) primär im Rahmen einer regionalen Modellkonzeption und konnten nur eingeschränkt für das Alarmmodell genutzt werden.

4.1.3 Einspeisung

Da das Rheinalarmmodell Transportberechnungen für im Wasser gelöste Stoffe durchführt, galt es in Abhängigkeit von dieser Bedingung geeignete Markierstoffe für die Naturversuche zu evaluieren. Prinzipiell kommen dafür drei Markierstoffgruppen in Frage: Fluoreszierende Tracer, Salze und radioaktive Substanzen. Salze müssen aufgrund der notwendigen großen Einsatzmengen und der spätestens nach den Einleitungen der elsässischen Kaliminen sehr hohen Hintergrundkonzentrationen ausgeschieden werden, radioaktive Tracer aufgrund der in der Regel sehr eingeschränkten Bewilligungspraxis. So entschied man sich bei allen zur Kalibrierung und Verifikation des Rheinalarmmodells durchgeführten Markierversuchen für fluoreszierende Tracersubstanzen. Sie zeichnen sich allgemein dadurch aus, daß sie in der Lage sind, selbst große Wasservolumina mit geringen Einspeisemengen zu markieren und daß sich noch geringe Tracerspuren quantitativ nachweisen lassen. Fluoreszenztracer sind keine idealen Markiersubstanzen und sie sind z.B. aufgrund ihrer spezifischen Sorptionsneigungen und chemischen Instabilitäten nicht gleichermaßen geeignet. Bei den schweizerischen Markierversuchen entschied man sich für den Universaltracer Uranin (Natrium-Fuoreszein, $C_{20}H_{10}O_5Na_2$). Für die deutsch-niederländischen Markierversuche wählte man aufgrund der wesentlich längeren Versuchsdistancen und Fließzeiten und der relativ starken Neigung von Uranin zum photolytischen Zerfall (Halbwertszeit 11 Stunden) Rhodamin WT (Acid red 388, $C_{29}H_{29}O_5N_2Na_2Cl$). Dieser Tracer wies bei Versuchen mit künstlichem Tageslicht eine etwa um den Faktor 100 größere Halbwertszeit (1300 Stunden) auf. Bei den französischen Markierversuchen kam 1988 Rhodamin WT und 1990 und 1991 Rhodamin B (Halbwertszeit 780 Stunden) als Markierstoff zum Einsatz.

4.1.4 Probenahme und -analyse

Die Tracereinleitungen aller Markierversuche werden als momentane Einspeisungen betrachtet. Die tatsächlichen Einleitungsdauern lagen dabei zwischen 1,5 und 6 Minuten bei den schweizerischen und deutsch-niederländischen Versuchen und bis zu 70 Minuten bei dem französischen Tracerexperiment vom November 1988, bei dem sich in einigen Farbstofffässern ein schwer löslicher Bodensatz gebildet hatte.

Von wenigen Standorten mit Handprobenahmen oder in situ-Messungen abgesehen, wurden die Konzentrationen in der Regel über automatische Probenentnahmegeräte erfaßt. Diese Geräte wurden für die Versuchszeiträume an definierten Stellen innerhalb der festgelegten Flußquerschnitte installiert. Im Vorfeld der Versuche erfolgte, in Abhängigkeit der Entfernung zwischen Einleitungs- und jeweiliger Beobachtungsstelle, die Vorberechnung der Zeitintervalle für die Wasserprobenahmen, welche zwischen wenigen Minuten und mehreren Stunden betragen können. Für möglichst unbeeinflusste Ergebnisse bewährte sich die Abfüllung der Proben in Braunglasflaschen, die später in den Labors analysiert wurden.

Wie sich bei allen Markierversuchen zeigte, kommt der richtigen Auswahl des Probenahmestandortes entscheidende Bedeutung zu. Unter der Annahme, daß die Stoffe nach der Einspeisung über die Tiefe und Breite des Flusses relativ rasch gleichmäßig verteilt sind, hatten die Probenahmen prinzipiell an beliebigen Orten innerhalb eines Flußquerschnittes erfolgen können. In der Praxis kann es davon aber, z.B. nach dem Zustrom unmarkierter Nebenflüsse, zum Teil gravierende Abweichungen geben. Bei den schweizerischen und deutsch-niederländischen, speziell für das Rheinalarmmodell durchgeführten, Markierversuchen bemühte man sich in der Regel um Meßstandorte im Stromstrich. Gute Ergebnisse konnten auch bei Probenahmestandorten im direkten Unterwasser von Kraftwerken erzielt werden, wo der Tracer nach der Turbinenpassage gut durchmischt austritt. In Ausnahmen konnte

die Probenentnahme weder von Kraftwerken noch von Brücken aus erfolgen, sodaß die Installation der Entnahmegerate auf ufernahen Steigern stattfand. Die Probenahmen der französischen Markierversuche wurden generell vom Ufer aus vorgenommen.

In Anbetracht des maßgeblichen Anteils des Probenahmestandortes an der Repräsentativität des Datenmaterials für den betreffenden Querschnitt ist jede gewonnene Tracerdurchgangskurve nur in Kenntnis dieser Angabe in ihrer Aussagekraft zu bewerten.

Die Analyse der über die automatischen Probenahmegeräte gewonnenen Wasserproben erfolgte in der Regel mit Spektralfluorometern nach dem Synchronscan-Verfahren. Eine Ausnahme bildete die Untersuchung der Wasserproben zwischen Karlsruhe und Bimmen beim Markierversuch 04/89. Diese Tracerkonzentrationen wurden bei der Bundesanstalt für Gewässerkunde in Koblenz mit einem Filterfluorometer analysiert. Stichprobenartig wurden einige der in den niederländischen Rheinzeigen genommenen Proben beim Rijkswaterstaat mit dem HPLC-Verfahren untersucht. Diese in der Tracerhydrologie recht neue Analysemethode zeichnet sich durch eine sehr hohe Nachweisempfindlichkeit aus, welche in klarem Wasser für Rhodamin WT bei 10 pg/l liegt. Leider ist das HPLC-Verfahren relativ teuer und vergleichsweise zeitaufwendig, was es für den routinemäßigen Einsatz bei Tracerexperimenten mit hohem Probenaufkommen nur eingeschränkt einsetzbar macht. Bei den Vergleichen zwischen den HPLC-Analysen und den spektralfluorometrischen Meßergebnissen zeigte sich eine gute Übereinstimmung der Resultate.

Für die spektralfluorometrischen Analysen nach dem SynchronScan-Verfahren gelten Nachweisgrenzen von 0,002 mg/m³ für Uranin und 0,006 mg/m³ für Rhodamin WT in klarem Wasser.

4.1.5 Abflußwerte und Tracerfrachten

Für die Berechnung der Tracerfrachten sowie die Kalibrierung und Verifikation des Rheinalarmmodells gilt es, den Abflußverlauf während eines Markierversuches möglichst gut zu erfassen. Die Bestimmung des mittleren Abflusses, für die einzelnen Rheinabschnitte, erfolgt auf Basis der gemessenen Stofftransportgeschwindigkeit der Markierstoffwelle (bezogen auf das Konzentrationsmaximum). Mit Hilfe dieser Geschwindigkeiten kann für jeden Ort die Stofftransportzeit vom Einspeisepunkt bis zu diesem Flußkilometer berechnet werden. Abbildung 4.1.2. gibt diese Laufzeiten exemplarisch für den Markierversuch 04/89 (Einleitungsstelle Village-Neuf, Fluß-km 174,1) wieder. Aus einem solchen Verlauf ist die Zeitspanne herzuleiten, in welcher der Markierstoffhauptdurchgang einen Teilabschnitt des Rheinalarmmodells passiert hat. Die in das Alarmmodell einzugebenden mittleren Abschnittsabflüsse errechnen sich dann aus den anteilig gewichteten Abfluß-Tagesmittelwerten für den Zeitraum der Markierstoffpassage eines Abschnittes [siehe z.B. Leibundgut & Wiesner, 1992]. Dabei wird von der Annahme ausgegangen, daß der an einer Wasserstandsmeßstelle beobachtete Abfluß für einen bestimmten Rheinabschnitt repräsentativ ist. Kriterium für den Abschnittsein- bzw. Austritt der Tracerwelle ist das Konzentrationsmaximum.

Eine starke anthropogene Beeinflussung des Abflußgeschehens auf Hoch- und Oberrhein resultiert aus den Stauhaltungen der Kraftwerke. So erfolgt die Betriebswassersteuerung der Wasserkraftwerke im Oberrhein zwischen Basel und Karlsruhe bis zu einem Abfluß von etwa 1200 m³/s im sogenannten Schwellbetrieb. Er ermöglicht die Erzeugung von Spitzenenergie auch dann, wenn die natürliche Energieerzeugungsmöglichkeit infolge Niedrigwasser eingeschränkt ist. Die Stauhaltungen der einbezogenen Kraftwerke werden hierfür um 20 bis 50 Zentimeter abgesenkt, um kurzfristig höhere Energiemengen erzeugen zu können. Da die Kraftwerke für Abflüsse von maximal 1400 m³/s ausgerichtet sind, werden über diesem Betrag liegende Abflußmengen über den Restrhein abgeleitet. Zu Niedrigwasserzeiten ist für den Restrhein eine Mindestwassermenge von 30 m³/s vertraglich zugesichert.

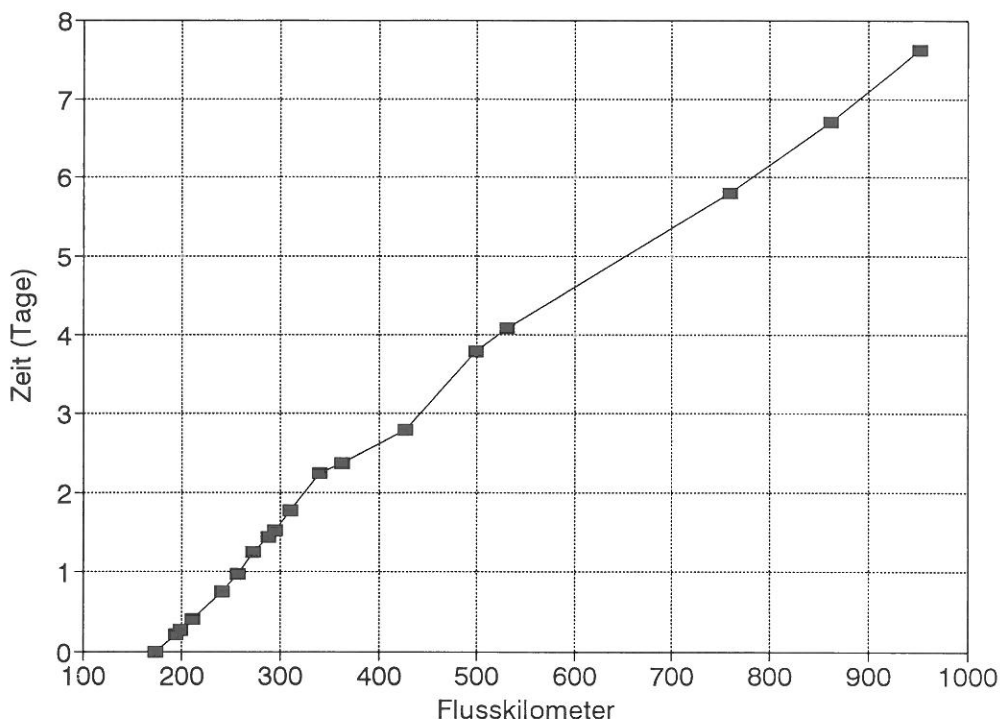


Abb. 4.1.2 Stofftransportzeiten (bezogen auf das Konzentrationsmaximum) Markierversuch 04/89

Solche regulierenden Eingriffe in das Abflußgeschehen haben auf den betreffenden Strecken des Rheines gravierenden Einfluß auf die Stoffausbreitung. Unter solchen Bedingungen durchgeführte Markierversuche liefern zwangsläufig von diesen Eingriffen beeinflusste Werte der Transportparameter.

Die Ermittlung der an den jeweiligen Meßstationen zurückgewonnenen Tracerfracht M erfolgte für das Rheinalarmmodell nach folgender Formel:

$$M = Q \cdot \sum_{i=1}^n \phi_i \cdot dt_i \quad (4.1.1)$$

mit: Q = mittlerer Abschnittsabfluß
 Φ_i = zum Zeitpunkt t_i gemessener Konzentrationswert
 dt_i = Zeitintervall zwischen zwei aufeinanderfolgenden Meßwerten
 n = Anzahl der Meßwerte

Die Bestimmung der korrekten Tracerfracht setzt an den einzelnen Meßstationen die Erfassung vollständiger Tracerdurchgänge voraus. Dies ist bei den nachfolgend vorgestellten Markierversuchen nicht immer in gleichem Maße der Fall. Aber auch innerhalb eines Markierversuches sind die »tailings« der Durchgangskurven, je nach Dauer der Aufzeichnung und Nachweisgrenze bzw. Hintergrundkonzentration (Grundlast) an der jeweiligen Meßstelle, unterschiedlich ausgeprägt.

Die staugeregelten Strecken des Rheins weisen zudem ein Phänomen auf, daß in wesentlich kleineren Maßstäben auch in kleinen Stillwasserzonenbereichen vorzufinden ist. Hier wird Markiersubstanz in Bereichen schwacher Strömung aufgehalten und erst mit Verzögerung dem schneller fließenden Wasser wieder zugemischt. Es kommt somit zu einem Verdünnungsvorgang, der, besonders nach mehrmaliger Wiederholung dieses Prozesses in Kraftwerksketten, dazu führen kann, daß ein gewisser Anteil des Tracers die Meßstationen unterhalb der Nachweisgrenze passiert.

Mögliche Tracerverluste können auch durch Infiltration von Fluß- in Grundwasser auftreten oder sind, in Abhängigkeit der verwendeten Markiersubstanz und ihren Eigenschaften, in der Sorption an Sediment und der chemischen-physikalischen und photochemischen Zerstörung des Tracers zu suchen.

Weitere Ungenauigkeiten der berechneten Tracerfrachten werden durch im Tagesverlauf schwankende Abflüsse hervorgerufen, da lediglich Abflusstage Mittelwerte in die Berechnungen eingehen.

4.2 Versuche in der Schweiz

4.2.1 Untersuchte Flußstrecken

Von der Landeshydrologie und -geologie wurden in Zusammenarbeit mit dem Geographischen Institut der Universität Bern und der Firma Naturaqua, Bern, 1988 und 1989 zwei Markierversuche auf der Hochrheinstrecke zwischen Bodensee und Basel durchgeführt [Leibundgut et al. 1988 und Petermann et al. 1989]. Der Versuch vom 27. September 1988 galt dabei der Untersuchungsstrecke von Albruck (Fluß-km 113,5) bis Kembs (Fluß-km 179,8), der Markierversuch vom 18. Juli 1989 dem Versuchsabschnitt von Rheinau (Fluß-km 58,8) bis Kembs (Fluß-km 179,8); siehe Abb. 4.1.1.

Für das erste Tracerexperiment erfolgte die Einleitung von 235 Kilogramm der vorgelösten Markiersubstanz Natrium-Fluoreszein in den Auslauf der Abwasserreinigungsanlage von Albruck. Die zweite Markierung mit 200 Kilogramm Tracersubstanz wurde innerhalb von 1,5 Minuten in den Auslauf der Abwasserreinigungsanlage von Rheinau vorgenommen.

Tabelle 4.2.1 Einspeisung, Untersuchungsstrecke, Abfluß und Tracer der Markierversuche 09/88 und 07/89

Markierversuch/ Einspeisetag	untersuchte Strecke [Fluß-km]	mittl. Q bei Einsp. [m ³ /s]/Pegel	Einspeisemenge [kg]/Tracer
MV 09/88 27.09.88	Albruck-Basel 113,5 - 179,8	712 Rheinfelden	235 Uranin
MV 07/89 18.07.89	Rheinau-Basel 58,8 - 179,8	490 Rheinau	200 Uranin

4.2.2 Abflußverhältnisse

Für das Tracerexperiment vom September 1988 wies der Abfluß des Rheins am Pegel Rheinfelden (Fluß-km 148,26) innerhalb des Versuchszeitraumes, von 712 auf 679 m³/s, eine leicht sinkende Tendenz ohne größere Schwankungen auf. Ein Abfluß von 712 m³/s entspricht an dieser Meßstation einem Wasserstand von 213 Zentimetern.

Bei der Einspeisung zum Markierversuch 07/89 am 18. Juli 1989 führte der Rhein bei Rheinau einen mittleren Tagesabfluß von 555 m³/s. Die Aare zeigte zu dieser Zeit Abflußwerte gleicher Größenordnung, sodaß am Pegel Rheinfelden, nach dem Zusammenfluß von Rhein und Aare, während der Versuchstage mittlere Tagesabflüsse zwischen 1 086 und 1 025 m³/s ohne größere Schwankungen zu verzeichnen waren.

4.2.3 Stofftransportgeschwindigkeiten

Tabelle 4.2.2 zeigt die abschnittsweise berechneten mittleren Stofftransportgeschwindigkeiten des Tracerexperiments 09/88 von Albruck bis Basel. Berücksichtigt wurden hierfür nur die repräsentativsten Meßstellen, d.h. insbesondere ufernah gewonnene Tracerdurchgangskurven fanden keine Berücksichtigung [Schudel/ Petermann, 1991]. Da entlang der Versuchsstrecke während des Untersuchungszeitraumes keine detaillierten Abflußmessungen durchgeführt wurden, ist ein mittlerer Abflußwert für den Versuchszeitraum von 700 m³/s angegeben.

Tabelle 4.2.2 Mittlere Stofftransportgeschwindigkeiten (c) (abschnittsweise) beim Markerversuch 09/88 Albrbruck - Basel

Strecke	Fluß-km	Q	c
Albrbruck - Laufenburg	113,5 - 122,0	700	0,82
Laufenburg - Stein	122,0 - 130,2	700	0,62
Stein - Riburg	130,2 - 143,5	700	0,49
Riburg - Augst/Wyhlen	143,5 - 155,9	700	0,68
Augst/Wyhlen - Birsfelden	155,9 - 163,8	700	0,48
Birsfelden - Kembs	163,8 - 179,8	700	0,61

c : mittlere Stofftransportgeschwindigkeit [m/s]
 Q : mittlerer Abfluß [m³/s]

Die abschnittsweise berechneten Stofftransportgeschwindigkeiten bewegen sich zwischen 0,48 und 0,82 m/s. Die mittlere Stofftransportgeschwindigkeit über die gesamte Versuchsstrecke beträgt 0,59 m/s.

Wie bei allen staugeregelten Flußstrecken können die Meßergebnisse durch den Betrieb der Kraftwerke beeinflusst sein. Ohne detaillierte Abflußmessungen während der Versuche lassen sich diese künstlich hervorgerufenen, oft nur kurzzeitigen Abflußschwankungen in der Regel nur schwer erfassen bzw. herausrechnen. Trotzdem sollten sie bei starken Schwankungen der ermittelten Stofftransportgeschwindigkeiten als Ursache in Erwägung gezogen werden. Zudem besteht die Möglichkeit, daß während einer Tracerpassage nicht alle Turbinen einer Stauhaltung in Betrieb sind. Hierdurch kann es zu einer sehr punktuellen quasi-Neueinspeisung kommen, welche, je nach Lage der betriebenen Turbine im Flußquerschnitt und der Länge des nachfolgenden Meßabschnittes, die mittleren Stofftransportgeschwindigkeiten beeinflussen kann.

Tabelle 4.2.3 Mittlere Stofftransportgeschwindigkeiten (c) (abschnittsweise) beim Markerversuch 07/89 Rheinau - Basel

Strecke	Fluß-km	Q	c
Rheinau - Rüdlingen	58,8 - 67,1	490	1,59
Rüdlingen - Br.Eglisau	67,1 - 74,5		0,68
Br.Eglisau - Kw-Eglisau	74,5 - 78,7		0,49
Kw-Eglisau - Rekingen	78,7 - 90,1	555	0,68
Rekingen - Zurzach	90,1 - 93,5		1,39
Zurzach - Koblenz	93,5 - 101,6		1,52
Koblenz - Albrbruck	101,6 - 108,9		0,66
Albrbruck - Laufenberg	108,9 - 122,0		1,81
Laufenberg - Säckingen	122,0 - 129,3		0,88
Säckingen - Riburg	129,3 - 143,5		0,73
Riburg - Augst	143,5 - 155,9	1068	0,99
Augst - Birsfelden	155,9 - 163,8		0,79
Birsfelden - Kembs	163,8 - 179,8		0,85

c : mittlere Stofftransportgeschwindigkeit [m/s]
 Q : mittlerer Abfluß [m³/s]

Tabelle 4.2.3 zeigt die abschnittsweise berechneten Stofftransportgeschwindigkeiten für den Markerversuch von Rheinau bis Basel vom September 1989. Die Werte schwanken in den einzelnen Kompartimenten zwischen 0,49 und 1,59 m/s. Die mittlere Fließgeschwindigkeit über die gesamte Fließstrecke beträgt 0,89 m/s.

Auffallend an den angeführten Resultaten sind drei Bereiche mit relativ hohen mittleren Stofftransportgeschwindigkeiten. Es sind dies die Rheinabschnitte von Rheinau bis Rüdlingen (1,59 m/s), von Rekingen bis Koblenz (1,49 m/s) und von Albbruck bis Laufenburg (1,81 m/s). Hierbei handelt es sich um Teilstrecken, in denen der Rhein, innerhalb der insgesamt stark staugeregelten Untersuchungsstrecke, weitgehend ungestaut frei fließen kann.

Die Detailauswertungen des Versuches [Petermann et al., 1989] wiesen das Phänomen auf, daß für die Abschnitte zwischen Koblenz und Albbruck sowie zwischen Augst und Birsfelden höhere mittlere als maximale Stofftransportgeschwindigkeiten berechnet wurden. Das bedeutet, daß sich der Schwerpunkt der Tracerwolke schneller bewegt als die Tracerfront. Für den Abschnitt von Albbruck bis Laufenburg kann dieser Sachverhalt wahrscheinlich dadurch erklärt werden, daß sich bis zur Meßstelle Albbruck das unmarkierte Aarewasser noch nicht vollständig mit dem markierten Rheinwasser vermischt hatte. Diese Vermischung fand erst nach der Turbinierung im Kraftwerk Albbruck statt. Die Resultate für den Abschnitt zwischen Augst und Birsfelden sind nicht eindeutig zu erklären.

4.2.4 Tracerfrachten

Tabelle 4.2.4 weist für den Markierversuch 09/88 zwei Abschnitte überproportional hoher Tracerverluste aus. Für die Strecke von Laufenburg bis Riburg ist infolge der sonnigen Witterung photochemische Zerstörung des Tracers durch das Sonnenlicht denkbar. Die sprunghafte Abnahme der Tracerfracht von Birsfelden nach Kembs könnte auf chemisch-physikalischen Abbau des Natrium-Fluoreszeins im Raum Basel hindeuten.

Tabelle 4.2.4 Tracerfrachten beim Markierversuch 09/88 Albbruck - Basel

Meßstation	Flußkilometer	Tracerfracht [kg]
Albbruck	113,5	235 (Einspeisung)
Laufenburg	122,0	246,8
Stein	130,2	188,0
Riburg	143,5	145,2
Augst/Wyhlen	155,9	137,5
Birsfelden	163,8	126,0
Kembs	179,8	79,2

Tabelle 4.2.5 mit den Tracerfrachten des Markierversuches 07/89 zeigt, daß auch hier nicht von einer gleichmäßigen Abnahme gesprochen werden kann. Relativ starke Tracerverluste weist der erste Teil der Untersuchungsstrecke bis Albbruck auf. Sie können durch die Zerstörung des Natrium-Fluoreszeins durch Sonneneinstrahlung erklärt werden. Es folgt eine Phase der Stabilisierung der Verluste auf der Strecke von Laufenburg bis nach Augst. Dieser Abschnitt wurde von der Tracerwolke nachts durchflossen, sodaß kein photochemischer Einfluß wirken konnte. Die starken Verluste unterhalb von Augst stehen wahrscheinlich wiederum in Zusammenhang mit chemischer Zerstörung durch Fremdstoffe im Rhein bei Basel.

Tabelle 4.2.5 Tracerfrachten beim Markierversuch 07/89 Rheinau - Basel

Meßstation	Flußkilometer	Tracerfracht [kg]
Rheinau	58,8	200 (Einspeisung)
Rüdlingen	67,1	200,0
Brücke Eglisau	74,5	200,0
Kraftwerk Eglisau	78,7	200,0
Rekingen	90,1	164,2
Zurzach	93,5	140,0
Koblenz	101,6	123,6
Albbruck	108,9	120,0
Laufenburg	122,0	105,6
Säckingen	129,3	96,2
Riburg	143,5	98,8
Augst	155,9	94,6
Birsfelden	163,8	79,6
Kembs	179,8	32,8

4.2.5 Spezielle Arbeiten

Neben den Konzentrationsermittlungen über die stationär gewonnenen Wasserproben wurden bei beiden Tracerexperimenten in situ-Messungen der Markierstoffwolke durchgeführt. Dies geschah mit Unterwasser-Filterfluorometer-Meßketten, welche die Aufnahme von Vertikalprofilen oder horizontalen Schleppprofilen erlauben. Während des Versuches von Albbruck bis Basel im September 1988 wurden damit in erster Linie die Front und der erste Anstieg der Tracerwolke an definierten Querschnitten erfaßt. Hierbei konnte die sukzessive Abnahme der Geschwindigkeiten mit fortschreitender Annäherung zu den Stauwehren detailliert aufgezeigt werden.

Beim Markierversuch des Jahres 1989 von Rheinau bis Basel galt besonderes Augenmerk der Untersuchung des Uraninzerfalls durch Sonnenlicht. Mit rund 32 Prozent Tracerverlust pro Tag (bei bedecktem Himmel) für ein durchschnittliches Rheinprofil wurden unerwartet hohe Werte ermittelt.

4.3 Versuche in Deutschland und den Niederlanden

4.3.1 Untersuchte Flußstrecken

Von der Bundesanstalt für Gewässerkunde in Koblenz wurden in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Hydrologie der Universität Freiburg von 1989 bis 1991 auf der deutschen Rheinstrecke drei Markierversuche durchgeführt. Fortführend fanden bei diesen Experimenten Messungen in den niederländischen Rheinseiten durch den Rijkswaterstaat statt, welcher auch die Markiersubstanz zur Verfügung stellte.

Die bei diesen Markierversuchen untersuchte Rheinstrecke reichte jeweils von der Einspeisestelle bei Village-Neuf (Beginn des Rheinseitenkanals; Fluß-km 174,1) bis zu den Standorten der letzten Probenahmen in den Niederlanden an Waal (Vuren, Fluß-km 951,8), Nederrijn-Lek (Hagestein, Fluß-km 946,5) und IJssel (Kampen, Fluß-km 994,5) (siehe Abb. 4.1.1. und Tab. 4.3.1.).

Gegenüber den schweizerischen Markierversuchen auf der Hochrheinstrecke mit zwei unterschiedlichen Einspeisestellen bietet sich bei den deutsch-niederländischen Tracerexperimenten, auf jeweils gleicher Untersuchungsstrecke, die Möglichkeit des direkten Vergleichs der bei unterschiedlichen Abflußbedingungen erzielten Ergebnisse.

Tabelle 4.3.1 Einspeisung, Untersuchungsstrecke, Abfluß und Tracer der Markierversuche 04/89, 09/90, 07/89

Markierversuch/ Einspeisetag	untersuchte Strecke [Fluß-km]	mittl. Q bei Einsp. [m ³ /s]/Pegel	Einspeisemenge [kg]/Tracer
MV 04/89 26.04.89	174,1 - 994,5	1 170 Rheinfelden	100 Rhodamin WT
MV 09/90 11.09.90	174,1 - 951,8	663 Rheinfelden	100 Rhodamin WT
MV 06/91 25.06.91	174,1 - 951,8	1 820 Rheinfelden	100 Rhodamin WT

4.3.2 Abflußverhältnisse

Zur Kalibrierung und Verifikation des Rheinalarmmodells waren zwischen Basel und den Niederlanden Markierversuche bei niedriger, mittlerer und erhöhter mittlerer Wasserführung des Rheins vorgesehen.

Während der Abfluß beim Niedrigwasser-Markierversuch 09/90 mit einem Wert von 663 m³/s (Rheinfelden) begann und auch im weiteren Verlauf einer Niedrigwasserführung entsprach (siehe Abb. 4.3.1), vertauschten sich in den Tracerexperimenten 04/89 und 06/91 im Rheinverlauf die Rollen. Das als Mittelwasser-Markierversuch vorgesehen und mit 1 170 m³/s (Pegel Rheinfelden) begonnene Tracerexperiment entwickelte sich etwa ab Mainz (Fluß-km 498,5) zu einem Versuch erhöhter Mittelwasserführung. Dagegen begann der Markierversuch 06/91 mit einer erhöhten Wasserführung von 1 820 m³/s (Rheinfelden), danach stieg der Abfluß aber kaum noch an und behielt ab Mainz eher den Charakter einer mittleren Rheinwasserführung.

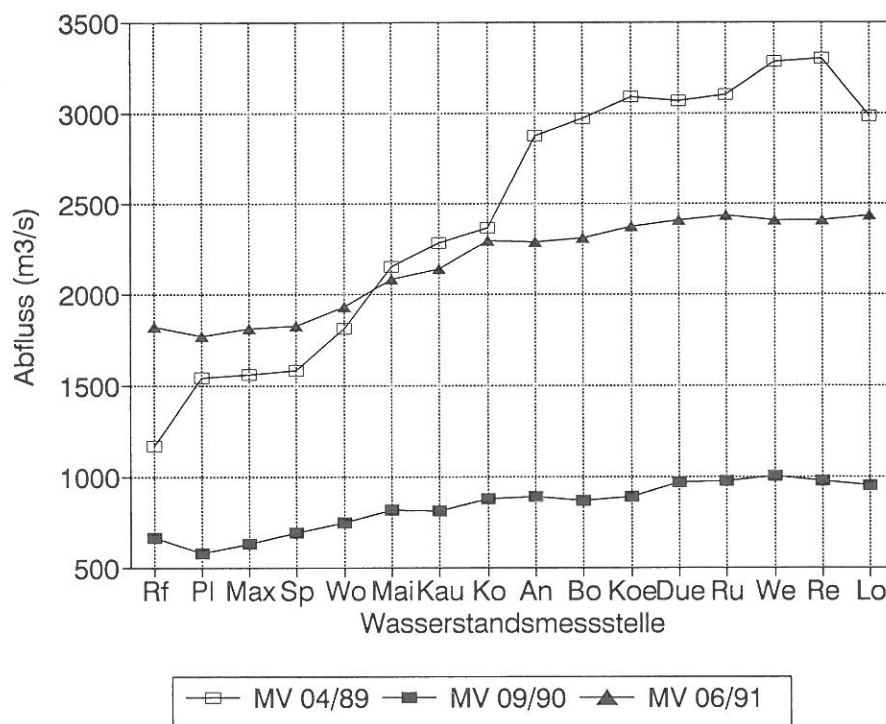


Abb. 4.3.1 Abflußbedingungen während der Markierversuche 04/89, 09/90 und 06/91

R=Rheinfelden, P=Plittersdorf, Mx=Maxau, S=Speyer, W=Worms, M=Mainz, K=Kaub, Ko=Koblenz, A=Andernach, B=Bonn, K=Köln, D=Düsseldorf, Ru=Ruhrort, W=Wesel, Re=Rees, L=Lobith

4.3.3 Stofftransportgeschwindigkeiten

Tabelle 4.3.2 führt die aus den Tracerdurchgangskurven des Markierversuchs 04/89 abschnittsweise mit SAMF ermittelten Stofftransportgeschwindigkeiten auf [Leibundgut et al. 1990/1]. Exemplarisch sind in der Abbildung 4.3.2 die hierfür verwendeten Markierstoffdurchgänge der ersten sechs Meßstationen Ottmarsheim bis Gerstheim (Fluß-km 194,4 - 272,55) graphisch dargestellt. Sie veranschaulichen die relativ rasche Abnahme der Maximalkonzentrationen, verbunden mit der Ausdehnung der Tracerpassagen.

Tabelle 4.3.2 Mittlere Stofftransportgeschwindigkeiten (c) (abschnittsweise) beim Markierversuch 04/89

Strecke	Fluß-km	Q	c
Village-Neuf - Ottmarsheim	174,1 - 194,4	1 170	1,09
Ottmarsheim - Neuenburg	194,4 - 199,25	1 170	1,09
Neuenburg - Fessenheim	199,25 - 211,10	1 170	1,08
Fessenheim - Marckolsheim	211,1 - 241,05	1 170	0,98
Marckolsheim - Rheinau	241,05 - 256,6	1 170	0,80
Rheinau - Gerstheim	256,6 - 272,55	1 170	0,68
Gerstheim - Straßburg	272,55 - 288,2	1 170	0,96
Straßburg - Kehl	288,2 - 294,15	1 170	0,87
Kehl - Gamsheim	294,15 - 310,5	1 540	0,65
Gamsheim - Plittersdorf	310,5 - 340,3	1 540	0,74
Plittersdorf - Maximiliansau	340,3 - 362,0	1 560	1,53
Maximiliansau- Mannheim	362,9 - 426,2	1 581	1,61
Mannheim - Mainz	426,2 - 498,5	2 150	0,90
Mainz - Bingen	498,5 - 530,1	2 280	1,04
Bingen - Düsseldorf	530,1 - 759,6	3 064	1,60
Düsseldorf - Lobith	759,6 - 862,2	2 979	1,43
Lobith - Hagestein	862,2 - 946,5	557 N	0,71
Lobith - Vuren	862,2 - 951,8	1 998 W	0,92
Lobith - Kampen	862,2 - 994,5	426 I	0,88

c : mittlere Stofftransportgeschwindigkeit [m/s]

Q : mittlerer Abfluß im Rheinalarmmodell-Abschnitt während der Tracerpassage [m³/s]

N, W, I : Teilabflüsse von Nederrijn-Lek, Waal und IJssel nach der Verzweigung des Rheins.
Die Teilabflüsse werden über Bezugslinien zum Pegel Lobith errechnet.

Erwartungsgemäß liegen die Stofftransportgeschwindigkeiten im Rheinseitenkanal über denen von Schlingenlösung und Flußausbau. Im freifließenden Rhein zeigen sich die Abschnitte direkt nach der Ausbaustrecke zwischen Plittersdorf und Mannheim (Fluß-km 340,3 - 426,2) und die Mittel-/Niederrheinstrecke Bingen bis Lobith (Fluß-km 530,1 - 862,2) als Bereiche hoher Transportgeschwindigkeiten.

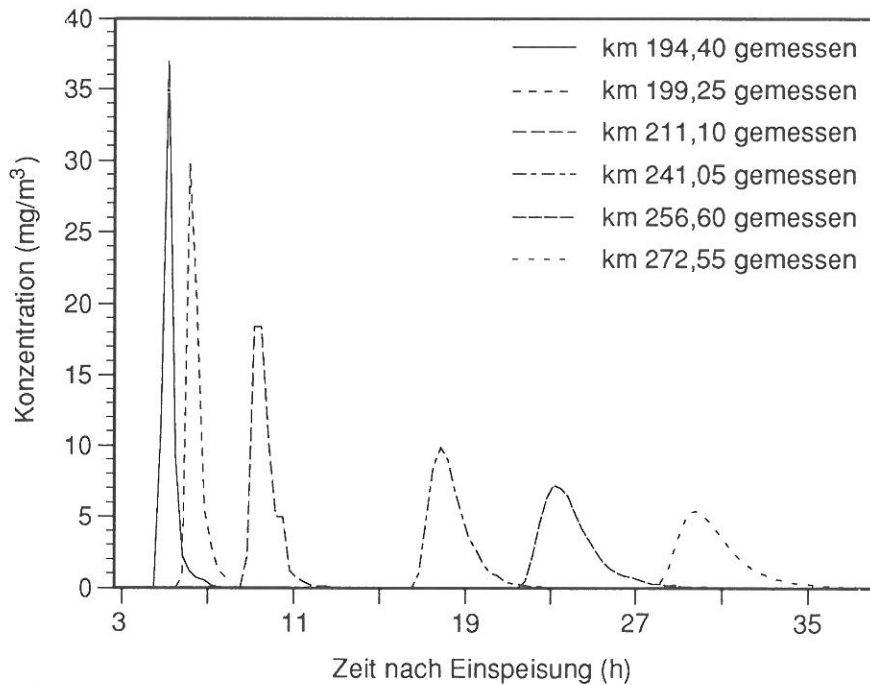


Abb. 4.3.2 Tracerdurchgänge des Markierversuches 04/89 Ottmarsheim bis Gerstheim (Fluß-km 194,4 - 272,55)

Tabelle 4.3.3 Mittlere Stofftransportgeschwindigkeiten (c) (abschnittsweise) beim Markierversuch 09/90

Strecke	Fluß-km	Q	c
Village-Neuf -Ottmarsheim	174,1 - 194,4	663	0,57
Ottmarsheim -Vogelgrün	194,4 - 224,9	663	0,57
Vogelgrün -Marckolsheim	224,9 - 241,05	663	0,46
Marckolsheim -Rheinau	241,05 - 256,6	663	0,37
Rheinau -Gerstheim	256,6 - 272,55	663	0,38
Gerstheim -Kehl	272,55 - 294,15	663	0,38
Kehl -Maximiliansau	294,15 - 362,0	578	0,45
Maximiliansau-Ludwigshafen	362,0 - 426,2	659	0,99
Ludwigshafen-Mainz	426,2 - 498,5	748	0,82
Mainz -Bad Honnef	498,5 - 640,0	848	0,92
Bad Honnef -Düsseldorf	640,0 - 759,6	909	1,05
Düsseldorf -Bimmen	759,6 - 865,02	984	0,91
Bimmen -Arnheim	865,02 - 876,9	199 P	0,44
Bimmen -Nimwegen	865,02 - 884,73	755 W	0,99
Nimwegen -Vuren	884,73 - 951,8	755 W	0,71
Bimmen -Kampen	865,02 - 994,5	174 I	0,56

c : mittlere Stofftransportgeschwindigkeit [m/s]

Q : mittlerer Abfluß im Rheinalarmmodell-Abschnitt während der Tracerpassage [m³/s]

P, W, I : Teilabflüsse von Pannerdens Kanal, Waal und IJssel nach der Verzweigung des Rheins. Die Teilabflüsse werden über Bezugslinien zum Pegel Lobith errechnet.

Tabelle 4.3.3 gibt die aus den Tracerdurchgangskurven des Markierversuchs 09/90 abschnittsweise ermittelten Stofftransportgeschwindigkeiten wieder. Bis auf wenige Ausnahmen zeigen sich auf dem freifließenden Rhein (ca. Fluß-km 334 - 870) nur geringe Schwankungen dieser Werte, was gegenüber

dem Markierversuch 04/89 auf die stationäreren Abflußbedingungen zurückzuführen sein dürfte (vgl. Abb. 4.3.1).

Tabelle 4.3.4 führt die aus den Tracerdurchgangskurven des Markierversuches vom Juni 1991 abschnittsweise ermittelten Stofftransportgeschwindigkeiten auf.

Tabelle 4.3.4 Mittlere Stofftransportgeschwindigkeiten (c) (abschnittsweise) beim Markierversuch 06/91

Strecke	Fluß-km	Q	c
Village-Neuf -Ottmarsheim	174,1 - 194,4	1 820	1,36
Ottmarsheim -Vogelgrün	194,4 - 224,9	1 820	1,50
Vogelgrün -Marckolsheim	224,9 - 241,05	1 820	0,97
Marckolsheim -Rheinau	241,05 - 256,6	1 820	1,00
Rheinau -Gerstheim	256,6 - 272,55	1 820	1,03
Gerstheim -Kehl	272,55 - 294,15	1 820	1,12
Kehl -Plittersdorf	294,15 - 340,3	1 772	0,85
Plittersdorf -Karlsruhe	340,3 - 359,2	1 811	1,58
Karlsruhe -Speyer	359,2 - 400,0	1 827	1,45
Speyer -Mannheim	400,0 - 424,7	1 827	1,52
Mannheim -Worms	424,7 - 443,5	1 929	1,01
Worms -Mainz	443,5 - 498,5	2 084	1,15
Mainz -Koblenz	498,5 - 590,35	2 140	1,20
Koblenz -Bad Honnef	590,35 - 640,0	2 312	1,43
Bad Honnef -Köln	640,0 - 689,5	2 375	1,53
Köln -Düsseldorf	689,5 - 759,6	2 408	1,47
Düsseldorf -Wesel	759,6 - 814,0	2 407	1,24
Wesel -Bimmen	814,0 - 865,02	2 383	1,29
Bimmen -Nimwegen	865,02 - 884,73	1 602 W	1,10
Nimwegen -Vuren	884,73 - 951,8	1 602 W	1,04
Bimmen -Hagstein	865,02 - 946,5	442 N	0,71

c : mittlere Stofftransportgeschwindigkeit [m/s]

Q : mittlerer Abfluß im Rheinalarmmodell-Abschnitt während der Tracerpassage [m³/s]

W, N : Teilabflüsse von Nederrijn-Lek und Waal nach der Verzweigung des Rheins. Die Teilabflüsse werden über Bezugslinien zum Pegel Lobith errechnet.

Auch hier lassen sich anhand der berechneten Stofftransportgeschwindigkeiten sehr gut der Rheinseitenkanal mit durchschnittlich 1,44 m/s (Fluß-km 174,0 - 225,0) und die Strecke mit Schlingenlösung und Flußausbau mit 0,98 m/s (Fluß-km 225,0 - 335,0) voneinander unterscheiden. Danach steigen die Geschwindigkeiten auf dem freiließenden Rhein, mit Ausnahme des Abschnittes von Mannheim bis Koblenz, bis zur deutsch-niederländischen Grenze auf Werte um 1,5 m/s an.

Tabelle 4.3.5 Vergleich der mittleren Stofftransportgeschwindigkeiten der Markierversuche 09/90, 04/89 und 06/91

Strecke [km]	09/90		04/89				06/91			
	Q	c	Q	Qf	c	cF	Q	QF	c	cF
174-194	663	0,57	1 170	(1,8)	1,09	(1,9)	1 820	(2,7)	1,36	(2,4)
194-241	663	0,53	1 170	(1,8)	1,02	(1,9)	1 820	(2,7)	1,32	(2,5)
241-257	663	0,37	1 170	(1,8)	0,80	(2,2)	1 820	(2,7)	1,00	(2,7)
257-273	663	0,38	1 170	(1,8)	0,68	(1,8)	1 820	(2,7)	1,03	(2,7)
273-294	663	0,38	1 170	(1,8)	0,94	(2,5)	1 820	(2,7)	1,12	(2,9)
294-361	578	0,45	1 546	(2,7)	0,97	(2,2)	1 811	(3,1)	1,06	(2,4)
361-425	659	0,99	1 581	(2,4)	1,61	(1,6)	1 827	(2,7)	1,48	(1,5)
425-499	748	0,82	2 150	(2,9)	0,90	(1,1)	2 084	(2,8)	1,11	(1,4)
499-760	876	0,98	2 969	(3,4)	1,53	(1,6)	2 408	(2,7)	1,44	(1,5)

Q : mittlerer Abfluß auf der angegebenen Rheinstrecke [m³/s]

QF : Faktor, mit dem der Abfluß über dem vom Markierversuch 09/90 liegt

c : mittlere Stofftransportgeschwindigkeit [m/s]

cF : Faktor, mit dem die Stofftransportgeschwindigkeit über der vom Markierversuch 09/90 liegt

Tabelle 4.3.5 zeigt eine Gegenüberstellung der abschnittsweise berechneten mittleren Stofftransportgeschwindigkeiten der Markierversuche 09/90, 04/89 und 06/91. Hierfür wurden Rheinabschnitte mit gleichen bzw. annähernd identischen Meßstationen bei allen drei Tracerexperimenten ausgewählt. Für einen leichteren Vergleich der Daten enthält die Tabelle neben den mittleren Abflüssen und Transportgeschwindigkeiten auf diesen Strecken die Faktoren QF und cF. Sie geben an, um das wievielfache die Abfluß- und Geschwindigkeitswerte der Tracerexperimente 04/89 und 06/91 über denen des Niedrigwasser-Markierversuches 09/90 liegen.

Für die gegebenen Abflußverhältnisse belegen die Vergleiche eine annähernd lineare Beziehung zwischen gesteigertem Abfluß und steigender Stofftransportgeschwindigkeit vom Beginn des Rheinseitenkanals (Fluß-km 174) bis etwa zum Ende von Schlingenlösung und Stromausbau (ca. Fluß-km 330). Spätestens ab Karlsruhe (Fluß-km 361) ist diese Relation nicht mehr gegeben. Im weiteren Rheinverlauf bis nach Düsseldorf (Fluß-km 760) kann eine dreifache Zunahme des Abflusses nur noch eine 1,5-fache Steigerung der Transportgeschwindigkeit hervorrufen.

4.3.4 Tracerfrachten

Tabelle 4.3.6 gibt die anhand von Gleichung 4.1.1 und auf Basis der mittleren Abschnittsabflüsse ermittelten Tracerfrachten für den Markierversuch vom April 1989 wieder.

Tabelle 4.3.6 Tracerfrachten des Markierversuches 04/89

Meßstation	Flußkilometer	Tracerfracht [kg]
Village-Neuf	174,1	100,0 (Einsp.)
Ottmarsheim	194,4	85,1
Neuenburg	199,25	84,1
Fessenheim	211,1	86,7
Marckolsheim	241,05	79,5
Rheinau	256,6	80,0
Gerstheim	272,55	68,3
Straßburg	288,2	62,6
Kehl	294,15	56,0
Gambsheim	310,5	87,4
Plittersdorf	340,3	77,5
Maximiliansau	362,0	72,0
Mannheim	426,2	73,2
Mainz	498,5	68,2
Bingen	530,15	83,9
Düsseldorf	759,6	81,0
Lobith	862,2	55,1
Hagestein	946,5	9,3 N
Vuren	951,8	29,0 W
Kampen	994,5	5,9 I

N, W, I: Teilfrachten von Nederrijn-Lek, Waal und IJssel nach der Verzweigung des Rheins.

(Anm.: Zur Berechnung der Frachten der Stationen Maximiliansau bis Düsseldorf wurden die korrigierten Tracerdurchgangskurven herangezogen [Van Mazijk et al., 1991]).

Nach relativ starken Verlusten bis zur ersten Meßstation stabilisieren sich die Werte der Tracerfrachten und weisen bis nach Kehl eine leicht sinkende Tendenz auf. Für Gambsheim errechnete sich aus noch ungeklärten Gründen ein neues Maximum dieses Parameters, um dann, abgesehen von den zu hohen Werten der Stationen Bingen und Düsseldorf, bis nach Lobith wieder relativ stetig zu fallen. Die niedrigen Werte der letzten drei niederländischen Meßpunkte erklären sich als Teilfrachten nach der Verzweigung des Rheins in Waal und Pannerdens Kanal, welcher seinerseits wiederum in Nederrijn-Lek und IJssel verzweigt.

In Tabelle 4.3.7 sind tabellarisch die Tacerfrachten des Markierversuchs vom September 1990 aufgeführt. Nach den erneut signifikanten Verlusten zwischen Einspeisung und erster Probenentnahmestation stellen sich, mit Ausnahme von Vogelgrün, bis nach Kehl relativ stabile Werte der Tracerfracht ein. In Vogelgrün könnte eine Umstellung im Turbinenbetrieb Ursache der zu niedrigen Rückgewinnung sein, sodaß der im Unterwasser des Kraftwerkes installierte Probenehmer nicht mehr im Bereich des Hauptdurchganges seine Wasserproben zog. Nach der Station Kehl gibt es auch beim Markierversuch 09/90 einen starken Sprung in der ermittelten Tracerfracht, im Gegensatz zum Versuch 04/89 diesmal allerdings nach unten.

Tabelle 4.3.7 Tracerfrachten des Markierversuches 09/90

Meßstation	Flußkilometer	Tracerfracht [kg]
Village-Neuf	174,1	100,0 (Einsp.)
Ottmarsheim	194,4	88,7
Vogelgrün	224,9	65,8
Marckolsheim	241,05	82,1
Rheinau	256,6	84,1
Gerstheim	272,55	87,5
Kehl	294,15	80,4
Maximiliansau	362,0	59,2
Ludwigshafen	426,2	50,8
Mainz	498,5	38,4
Bad Honnef	640,0	65,5
Düsseldorf	759,6	62,0
Bimmen	862,2	46,3
Nimwegen	884,73	37,9 W
Vuren	951,8	41,0 W
Kampen	994,5	7,5 I

W, I : Teilfrachten von Waal und IJssel nach der Verzweigung des Rheins.

Tabelle 4.3.8 Tracerfrachten des Markierversuches 06/91

Meßstation	Flußkilometer	Tracerfracht [kg]
Village-Neuf	174,1	100,0 (Einsp.)
Ottmarsheim	194,4	104,8
Vogelgrün	224,9	46,1
Marckolsheim	241,05	75,2 (98,9)
Rheinau	256,6	105,7 (140,2)
Gerstheim	272,55	70,2 (94,2)
Kehl	294,15	96,9
Plittersdorf	340,3	73,7
Karlsruhe	359,2	67,2
Speyer	400,0	71,6
Mannheim	424,7	77,4
Worms	443,5	62,4
Mainz	498,5	67,8
Koblenz	590,35	71,4
Bad Honnef	640,0	69,5
Köln	689,5	69,8
Düsseldorf	759,6	68,2
Wesel	814,0	54,6
Bimmen	865,02	61,8
Nimwegen	884,73	33,5 W
Vuren	951,8	27,2 W
Hagestein	946,5	7,9 N

W, N : Teilfrachten von Waal und Nederrijn-Lek nach der Verzweigung des Rheins.

Aus den im Juni 1991 gemessenen Konzentrationsverläufen und den mittleren Abschnittsabflüssen wurden die in Tabelle 4.3.8 dargestellten Tracerfrachten der 21 Meßstationen berechnet [Van Mazijk

et al., 1993]. Die ermittelten Werte können bei der Einspeisemenge von 100 Kilogramm auch als Rückgewinnungsraten (in %) betrachtet werden. Dabei ist für die Stationen Marckolsheim (Fluß-km 241,05), Rheinau (Fluß-km 256,6) und Gerstheim (Fluß-km 272,55) zu berücksichtigen, daß hier in den jeweiligen Kraftwerkskanälen, unter den herrschenden Abflußbedingungen, nur etwa 1400 m³/s (maximale Leistung der Kraftwerke) entlanggeflossen sind (vgl. Abs. 4.1.5). Der darüberhinausgehende Abflußbetrag wurde über die parallelen Restrheinstrecken geleitet. Damit stellen die für diese Stationen in Tabelle 4.3.8 angeführten Tracerfrachten nur etwa 75 Prozent der gesamten Fracht dieser Fluß-Kilometer dar. Die auf 100 Prozent hochgerechneten Werte sind kursiv dahinter angegeben.

Auf der Strecke des Rheinseitenkanals und der Schlingenlösung (Fluß-km 194,4 - 272,55) zeigen sich recht hohe Schwankungen in den Werten der Tracerfrachten. Obwohl immer die Möglichkeit der Einflußnahme der Kraftwerke auf den Abflußverlauf besteht, sollten die Schwankungen bei diesem Versuch nicht derartig hoch sein, da bei dem relativ hohen Abfluß nicht die Notwendigkeit zum Schwellbetrieb bestand.

4.3.5 Spezielle Arbeiten

Wie schon bei den schweizer Markierversuchen auf der Hochrheinestrecke, wurden auch bei den deutsch-niederländischen Tracerexperimenten von Meßschiffen aus Direktmessungen der Fluoreszenz vorgenommen. Hierfür kamen in situ-Meßketten zum Einsatz, die, mit Impulslicht-Filterfluorometern ausgerüstet, die direkte Aufnahme von Markierstoffkonzentrationen ohne Probenentnahme erlauben. Zusammen mit der Aufzeichnung von Tiefe und Temperatur kann somit, in hoher zeitlicher Auflösung, die Passage einer Tracerwolke in Form von Vertikal- oder Horizontalprofilen erfaßt und auf dem angeschlossenen Laptop ausgewertet werden. Besonders aber mit zunehmender Entfernung von der Einspeisestelle sind vollständige Aufnahmen der Tracerdurchgänge nur mit hohem Personal-, Material- und Zeiteinsatz realisierbar.

Mit der Direktmessungsmethode wurden Detailuntersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse nicht immer in die Kalibrierung und Verifikation des Rheinalarmmodelles einfließen, die aber für die Interpretation und Beurteilung der eindimensionalen stationären Meßergebnisse wichtige Hilfen darstellten. So wurden zum Beispiel quantitative Ausmessungen von Tracerkonzentrationen in Flußquerschnitten mit Bühnenfeldern und auch in Stauräumen vorgenommen. In situ-Messungen trugen aber auch zur Anpassung eines laufenden Meßprogrammes sowie zur Planung von Probenentnahmestandorten folgender Markierversuche bei.

Die dreidimensionale Abbildung 4.3.3. gibt exemplarisch die Verteilung des Markierstoffes über den Rhein-Querschnitt bei Nonnenweier (Fluß-km 268,3) während des Markierversuches vom September 1990 wieder. Etwa vier Kilometer vor dem Kraftwerk liegend, befand sich dieser Meßquerschnitt im aufgeweiteten Oberwasser der Staustufe Gerstheim, direkt vor der Verzweigung in Kraftwerkskanal und Restrhein. Die beispielhaft dargestellten Konzentrationen entstammen einer Wassertiefe von 0,5 Metern.

Der Hauptdurchgang der Tracerwolke erfolgte auf der Breite des dem Meßprofil folgenden Kraftwerkskanals (Flußbreite 600 - 750). Nach der Passage des gemessenen Konzentrationsmaximums breitete sich der Farbstoff verstärkt in den Stauraum vor dem Wehr zum Restrhein aus (Flußbreite 0 - 600), wo er auch noch lange nach dem Ende des Durchganges im Stromstrich (ca. Flußbreite 675) nachzuweisen war.

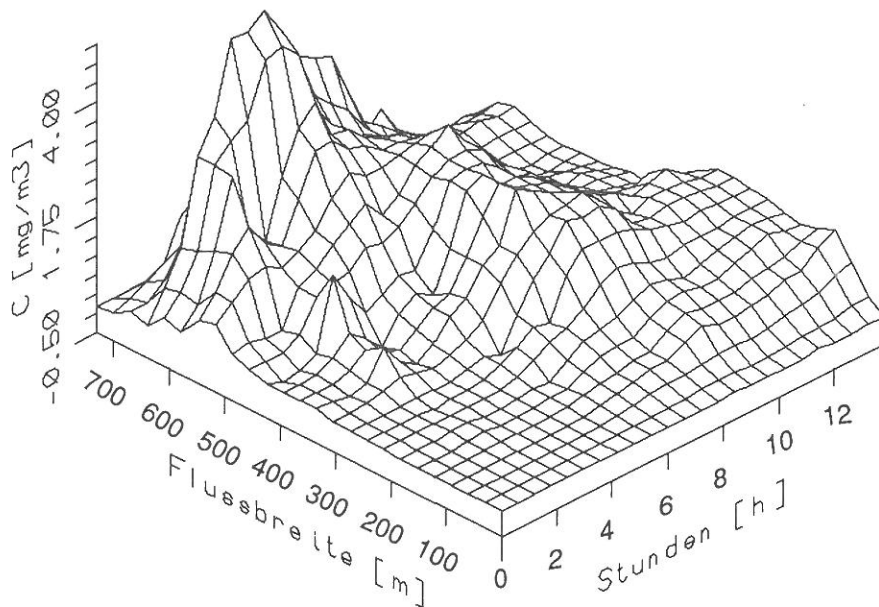


Abb. 4.3.3 in situ-Konzentrationsmessung MV 09/90, Nonnenweier (Fluß-km 268,3; Tiefe 0,5 m)

4.4 Versuche in Frankreich

4.4.1 Untersuchte Flußstrecken

Von der Societé Général des Eaux, Paris, wurden im Auftrag des Service de la Navigation de Strasbourg von 1988 bis 1991 drei Markierversuche im Rhein durchgeführt. Die Daten dieser eigentlich zur Eichung elsässischer Regionalmodelle durchgeführten Tracerexperimente wurden auch zur Verifikation des Alarmmodells für den Rhein herangezogen. Aufgrund der abweichenden Fragestellungen erfolgten die französischen Einspeisungen, im Gegensatz zu den rein für das Rheinalarmmodell initiierten deutsch-niederländischen Markierversuchen, vom linken Rheinufer und nicht von Strommitte aus. Dies bedingte im weiteren Verlauf größere Strecken bis zur homogenen Verteilung des Farbstoffes über den Flußquerschnitt. Auch die stationären Probenentnahmen wurden auf der von Frankreich betreuten Untersuchungsstrecke generell vom linken Ufer aus genommen.

Da es sich bei der Motivation zu diesen Markierversuchen um regionale Hintergründe handelte, umfaßten die französischen Versuchsstrecken nur die Oberrheinabschnitte von Hüningen (Fluß-km 169,1) bis nach Gerstheim (Fluß-km 273,3). Bei den Tracerexperimenten von Mai 1990 und Juli 1991 wurden von der Bundesanstalt für Gewässerkunde in Koblenz ergänzende Messungen der anschließenden Rheinrecke bis nach Bimmen (Fluß-km 865,02) durchgeführt.

4.4.2 Abflußverhältnisse

Tabelle 4.4.1 enthält neben dem zum jeweiligen Einspeisezeitpunkt herrschenden mittleren Tagesabfluß, Angaben über die gesamthaft bemessenen Rheinrecken sowie die Markierstoffart und Menge.

Tabelle 4.4.1 Einspeisung, Untersuchungsstrecke, Abfluß und Tracer der Markierversuche 11/88, 05/90, 07/91

Markierversuch/ Einspeisetag	untersuchte Strecke [Fluß-km]	mittl. Q bei Einsp. [m ³ /s]/Pegel	Einspeisemenge [kg]/Tracer
MV 11/88 18.11.88	169,1 - 273,3	550 Rheinfelden	74,5 Rhodamin WT
MV 05/90 15.05.90	169,0 - 865,02	1 008 Rheinfelden	80 Rhodamin B
MV 07/91 02.07.91	169,0 - 865,02	1 722 Rheinfelden	80 Rhodamin B

4.4.3 Stofftransportgeschwindigkeiten

Tabelle 4.4.2 stellt die aus den Konzentrationsverläufen des Markierversuchs 11/88 abschnittsweise berechneten Stofftransportgeschwindigkeiten dar. Aufgeführt sind nur die Meßstationen, die auch für die spätere Verifikation des Rheinalarmmodells relevant waren. So wurden zum Beispiel, dies gilt auch für die Markierversuche 05/90 und 07/91, keine Durchgangskurven ausgewertet, die in dem parallel zum Rheinseitenkanal verlaufenden Restrhein aufgenommen wurden. Dieser führte während des Versuchszeitraums nur die vertraglich vorgeschriebene Mindestwassermenge von 30 m³/s.

Tabelle 4.4.2 Mittlere Stofftransportgeschwindigkeiten (c) (abschnittsweise) beim Markierversuch 11/88

Strecke	Fluß-km	Q	c
Hünigen - Kembs	169,66 - 180,5	550	0,33
Kembs - Kembs-Niffer	180,5 - 185,5	550	0,32
Kembs-Niffer - Ottmarsheim	185,5 - 194,5	550	0,38
Ottmarsheim - Marckolsheim Süd	194,5 - 234,66	550	0,44
Marckolsheim Süd - Marckolsheim Nord	234,66 - 241,95	550	0,48
Marckolsheim Nord - Rheinau Süd	241,95 - 249,0	552	0,48
Rheinau Süd - Rheinau Nord	249,0 - 258,5	552	0,47
Rheinau Nord - Gerstheim Süd	258,5 - 268,5	552	0,44
Gerstheim Süd - Gerstheim Nord	268,5 - 273,3	552	0,45

c : mittlere Stofftransportgeschwindigkeit [m/s]
 Q : mittlerer Abfluß im Rheinalarmmodell-Abschnitt während der Tracerpassage [m³/s]

Die angegebenen Abflußwerte entstammen den Berechnungen des Rheinalarmmodells auf Basis des mittleren Tagesabflußwertes am Pegel Rheinfelden. Sie müssen also nicht den tatsächlichen Abflüssen auf dieser staugeregelten Oberrhein-Strecke entsprechen. So könnte zum Beispiel eine Aufstauphase während des bei diesen Abflußbedingungen üblichen Schwellbetriebes Ursache der relativ geringen Stofftransportgeschwindigkeiten im Rheinseitenkanal sein.

Der mittlere Tagesabfluß am Pegel Rheinfelden belief sich am Tag der Einspeisung zum Markierversuch 05/90 auf 1 008 m³/s. Die für die Tracerpassage an den einzelnen Meßstationen errechneten mittleren Abflußwerte und die mittleren Stofftransportgeschwindigkeiten sind der Tabelle 4.4.3 zu entnehmen.

Tabelle 4.4.3 Mittlere Stofftransportgeschwindigkeiten (c) (abschnittsweise) beim Markierversuch 05/90

Strecke	Fluß-km	Q	c
Hünigen - Kembs	169,1 - 180,5	1 008	0,89
Kembs - Kembs-Niffer	180,5 - 185,5	1 008	0,96
Kembs-Niffer - Ottmarsheim	185,5 - 194,5	1 008	0,95
Ottmarsheim - Marckolsheim Nord	194,5 - 241,95	1 008	0,86
Marckolsheim Nord - Gerstheim Süd	241,95 - 268,5	1 008	0,64
Gerstheim Süd - Gerstheim Nord	268,5 - 273,1	1 008	0,67
Gerstheim - Maximiliansau	273,1 - 362,0	1 129	0,75
Maximiliansau - Mannheim	362,0 - 424,7	1 118	1,48
Mannheim - Mainz	424,7 - 498,5	1 289	0,82
Mainz - Koblenz	498,5 - 590,35	1 330	1,11
Koblenz - Bad Honnef	590,35 - 640,0	1 428	1,15
Bad Honnef - Krefeld	640,0 - 763,7	1 517	1,19
Krefeld - Bimmen	763,7 - 865,0	1 518	1,05

c : mittlere Stofftransportgeschwindigkeit [m/s]
 Q : mittlerer Abfluß im Rheinalarmmodell-Abschnitt während der Tracerpassage [m³/s]

Die abschnittsweise berechneten Stofftransportgeschwindigkeiten des Markierversuches vom Juli 1991, welcher im direkten Anschluß an das deutsch-niederländische Tracerexperiment 06/91 stattfand, ist in Tabelle 4.4.4 dargestellt. Die Aufreihung der Meßstationen weist eine größere Lücke zwischen Fluß-Kilometer 248,3 und 443,5 auf, da die letzte auswertbare Tracerdurchgangskurve des französischen Untersuchungsabschnittes von der Station Rheinau, die erste der von der Bundesanstalt für Gewässerkunde betreuten Station aus Worms stammt.

Tabelle 4.4.4 Mittlere Stofftransportgeschwindigkeiten (c) (abschnittsweise) beim Markierversuch 07/91

Strecke	Fluß-km	Q	c
Hünigen - Kembs	169,1 - 174,1	1 722	0,54
Kembs - Kembs-Niffer	174,1 - 185,5	1 722	1,99
Kembs-Niffer - Ottmarsheim	185,5 - 194,6	1 722	1,38
Ottmarsheim - Fessenheim	194,5 - 212,1	1 722	1,39
Fessenheim - Marckolsheim Süd	212,1 - 234,66	1 722	1,04
Marckolsheim Süd - Rheinau	234,66 - 248,3	1 722	1,08
Rheinau - Worms	248,3 - 443,5	1 717	1,11
Worms - Mainz	443,5 - 498,5	1 833	1,01
Mainz - Rüdesheim	498,5 - 526,5	1 833	1,31
Rüdesheim - Koblenz	526,5 - 590,35	1 814	1,09
Koblenz - Bad Honnef	590,35 - 640,0	1 869	1,38
Bad Honnef - Düsseldorf	640,0 - 759,6	1 974	1,66
Düsseldorf - Bimmen	759,6 - 865,02	1 887	0,96

c : mittlere Stofftransportgeschwindigkeit [m/s]
 Q : mittlerer Abfluß im Rheinalarmmodell-Abschnitt während der Tracerpassage [m³/s]

Die Ursache der auffällig niedrigen Stofftransportgeschwindigkeit von 0,54 m/s auf der Strecke von Hünigen nach Kembs (Fluß-km 169,1 - 174,1) könnte darin begründet sein, daß sich die Markierstoffwolke nach der Einspeisung am linken Ufer weiter dort entlang bewegte, ohne sich wesentlich in die schneller fließende Strömung des Stromstriches einzumischen. Dies erfolgte erst nach der ersten Turbinierung im Kraftwerk von Kembs mit einem nachfolgend starken Anstieg der Transportgeschwindigkeit.

4.4.4 Tracerfrachten

Laut Versuchsprotokoll des Service de la Navigation de Strasbourg konnte nicht die gesamte für den Markierversuch 11/88 vorgesehene Tracermasse zur Einspeisung gebracht werden. Ein Teil der Substanz hatte sich in den Fässern abgesetzt und verfestigt, was auch die Ursache der verhältnismäßig langen Einspeisedauer von siebenzig Minuten war. Die in Tabelle 4.4.5 dargestellten Ergebnisse der berechneten Tracerfrachten sind zudem mit Vorsicht zu betrachten, da der 600 Meter stromabwärts der Einleitungsstelle vom linken Rheinufer abzweigende Hünninger Kanal während der Einspeisung geöffnet war. Nicht nur ein Teil des Rheinwassers, sondern auch ein nicht unbedeutender Teil des Tracers nahm diesen Weg und trug damit nicht zur Markierung des Oberrheins bei.

Tabelle 4.4.5 Tracerfrachten des Markierversuches 11/88

Meßstation	Flußkilometer	Tracerfracht [kg]
Hünigen	169,1	74,5 (Einsp.)
Kembs	180,5	75,7
Kembs-Niffer	185,5	63,8
Ottmarsheim	194,5	56,4
Marckolsheim Süd	234,66	36,8
Marckolsheim Nord	241,95	43,3
Rheinau Süd	249,0	52,2
Rheinau Nord	258,5	45,8
Gerstheim Süd	268,5	43,4
Gerstheim Nord	273,3	59,9

Tabelle 4.4.6 enthält die für den Markierversuch vom Mai 1991 ermittelten Werte der Tracerfrachten. Die theoretisch unmöglich hohen Ergebnisse der Stationen Kembs bis Ottmarsheim sind vermutlich darauf zurückzuführen, daß die Einspeisung wiederum vom linken Ufer vorgenommen und die Tracerwolke sich auf den ersten Kilometern vorwiegend dort entlang zog. So erreichte die oben genannten Meßstationen nicht homogen ausgemischtes, sondern stark mit Rhodamin konzentriertes Rheinwasser. Die hohen »Ausreißer-Werte« im weiteren Stromverlauf sind ohne detaillierte Konzentrationsdaten über die jeweiligen Flußquerschnitte nicht erklärbar.

Tabelle 4.4.6 Tracerfrachten des Markierversuches 05/90

Meßstation	Flußkilometer	Tracerfracht [kg]
Hünigen	169,0	80,0 (Einsp.)
Kembs	180,5	168,8
Kembs-Niffer	185,5	135,6
Ottmarsheim	194,5	110,5
Marckolsheim Nord	241,95	76,4
Gerstheim Süd	268,5	72,1
Gerstheim Nord	273,3	93,3
Maximiliansau	362,0	139,7
Mannheim	424,7	66,6
Mainz	498,5	43,8
Koblenz	590,35	122,7
Bad Honnef	640,0	91,7
Krefeld	763,7	38,2
Bimmen	865,02	17,7

Tabelle 4.4.7 stellt tabellarisch die aus den Tracerdurchgangskurven ermittelten Tracerfrachten des Markierversuchs 07/91 dar. Hierbei ist analog den Ergebnissen des Tracerexperimentes 06/91 für die Stationen Kembs bis Rheinau (Fluß-km 174,1 - 248,3) zu berücksichtigen, daß hier in den jeweiligen Kraftwerkskanälen, unter den herrschenden Abflußbedingungen, nur etwa 1400 m³/s entlanggeflossen sind (vgl. Abs. 4.1.5). Der darüberhinausgehende Abflußbetrag wurde über die parallelen Restrhinstrecken geleitet. Damit stellen die für diese Stationen in Tabelle 4.4.7 angeführten Tracerfrachten nur etwa 80 Prozent der gesamten Fracht dieser Flußkilometer dar. Die auf 100 Prozent hochgerechneten Werte sind kursiv dahinter angegeben.

Auch bei diesem französischen Tracerexperiment ist wieder eine geraume Flußstrecke (mindestens bis zur Station Marckolsheim) die unvollständige Durchmischung in folge Uferreinleitung nachzuweisen, bei gleichzeitiger Probenahme vom gleichen Ufer aus.

Von Worms bis Bimmen tritt eine Stabilisierung der Tracerfrachtwerte auf etwa 26,5 Kilogramm (bis auf die Ausnahme Worms) ein. Der allgemein niedrigere Durchschnitt der Werte auf dieser Strecke könnte zum einen seine Ursache darin haben, daß Rhodamin B einem stärkerem photochemischen Abbau unterliegt (vgl. Abs. 4.1.3). Zudem wurden die Proben von Kembs bis Rheinau und von Worms bis Bimmen in zwei verschiedenen Labors untersucht. Obwohl von gleichem Eichmaterial auszugehen war, kann auch hier eine potentielle Ursache für den krassen Übergang liegen.

Tabelle 4.4.7 Tracerfrachten des Markierversuches 07/91

Meßstation	Flußkilometer	Tracerfracht [kg]
Hünigen	169,1	80,0 (Einsp.)
Kembs	174,1	346,1 (454,2)
Kembs-Niffer	185,5	131,6 (163,3)
Ottmarsheim	194,6	109,0 (135,2)
Fessenheim	212,1	105,4 (130,7)
Marckolsheim Süd	234,66	80,8 (102,5)
Rheinau	248,3	73,4 (94,4)
Worms	443,5	14,0
Mainz	498,5	26,3
Rüdesheim	526,5	25,9
Koblenz	590,35	26,5
Bad Honnef	640,0	26,2
Düsseldorf	759,6	27,0
Bimmen	865,02	28,0

4.5 Schlußfolgerungen, Empfehlungen und Ausblick

Mit der fortschreitenden mathematischen Entwicklung des Alarmmodells für den Rhein wurde zur Eichung, und damit zur Verbesserung der Vorhersageergebnisse über den Verlauf von Schadstoffwellen, der Wunsch nach Naturdaten erhoben. Tracerversuche mit ungefährlichen fluoreszierenden Markiersubstanzen sind dabei in besonderem Maße dafür geeignet, Stofftransport und Ausbreitungsvorgänge im Gewässer selbst einzusehen.

Die in den zwischen 1988 und 1991 durchgeführten Markierversuchen erzielten Ergebnisse sind als durchaus geeignete Datenbasis anzusehen, das eindimensionale Rheinalarmmodell zu kalibrieren und zu verifizieren. Gleichermaßen zeigten die Experimente aber auch auf, in welchen Bereichen weiterhin Informationsbedarf herrscht.

Eines der vordringlichsten Probleme für eine verbesserte Durchführung und Auswertung von Markierversuchen liegt in der detaillierten Erfassung der Abflußbedingungen. Die Bestimmung des Abflusses parallel zu den Konzentrationsmessungen, z.B. von einem Meßschiff aus, würde helfen, bisher unerklärbare Ergebnisse bei Berechnung von Stofftransportgeschwindigkeiten und Tracerfrachten

zu benennen. Auch wäre es somit möglich, den Einfluß instationärer Abflußverhältnisse auf die Stoffausbreitung zu untersuchen. Um die bisher recht unberechenbare Größe der Abflußsteuerung im Schwellbetrieb der Kraftwerke auf der staugeregelten Strecke des Oberrhein besser in den Griff zu bekommen, sollte für kommende Markierversuche und verbesserte Vorhersagen mit dem Alarmmodell die Direktabfrage des aktuellen Abflusses an den Kraftwerken ermöglicht werden.

Die bisher durchgeführten großen Markierversuche mit Untersuchungsstrecken von zum Teil mehreren hundert Kilometern Flußlauf sollten in Zukunft durch kleinere Tracerexperimente mit Detailaufgaben ergänzt und verifiziert werden. Hier wären besonders zweidimensionale Betrachtungen, wie Stoffausbreitung nach Ufereinleitungen, aber auch die Konzentrationsverteilung nach dem Zustrom großer Nebenflüsse von Interesse. Solche Untersuchungen zu Konzentrationsverteilungen im Querschnitt des Flusses würden ebenso die Beurteilung der Repräsentativität von stationären Meßstellen vereinfachen, was die Güte aller daraus gewonnenen Parameter, insbesondere der Tracerfrachten, verbessern könnte.

Aus der Palette der fluoreszierenden Tracersubstanzen sollte bei zukünftigen Markierversuchen, wegen seiner Umweltschädlichkeit, auf Rhodamin B gänzlich verzichtet werden. Für den Bereich der stationären Probenentnahmen hat es sich als sinnvoll erwiesen, alle während eines Markierversuches gewonnenen Wasserproben in einem einzigen Labor auswerten zu lassen. Nur so können mögliche Fehlerquellen aus den Bereichen unterschiedlicher Analyseverfahren, abweichender Methoden des Laborpersonals und der Verwendung nicht exakt gleicher Eichlösungen vermieden werden. Dabei sind stichprobenartige Überprüfungen der Resultate, zum Beispiel mit dem HPLC-Verfahren, durchaus wünschenswert.

Für den Bereich der Markierversuche im Rahmen der Arbeiten zum Warn- und Alarmplan für den Rhein sei hier noch die gegenwärtig laufende Auswertung zweier Moselversuche erwähnt. Diese im Frühjahr und Herbst 1992 durchgeführten Tracerexperimente fanden bei Niedrig- und Hochwasser der Mosel statt. Die hieraus gewonnenen Ergebnisse werden ebenfalls in die weitere Kalibrierung und Verifikation des Rheinalarmmodells eingehen.

4.6 Literatur

- Behrens, H. und G. Teichmann (1982): Neue Ergebnisse über den Lichteinfluß auf Fluoreszenztracer. In: Beiträge zur Geologie der Schweiz-Hydrologie Nr. 28, Teil I, Bern
- Bremicker, M. (1989): Verfahren zur Analyse und Simulation der Stoffausbreitung in Fließgewässern, Diplomarbeit am Institut für Physische Geographie, Lehrstuhl für Hydrologie, Universität Freiburg
- Hofstraat, J.W., M. Steendijk, G. Vriezokolk, W. Schreurs, G.J.A.A. Broer, und N. Wijnstok: Sensitive und selective determination of Rhodamine WT water tracer by solidphase extraction and reversed-phase HPLC with fluorescence detection; Ministry of Transport and Public Works, The Hague & Lelystad
- Leibundgut, Ch., M. Bremicker, und H. Wiesner (1989): »Markierversuch Rhein 04/89«, Teilstrecke Oberrhein, Meßergebnisse; Institut für Physische Geographie, Lehrstuhl für Hydrologie, Universität Freiburg, Juli 1989
- Leibundgut, Ch., M. Bremicker und H. Wiesner (1990): »Markierversuch Rhein 04/89«, Abschlußbericht; Institut für Physische Geographie, Lehrstuhl für Hydrologie, Universität Freiburg, Juli 1990
- Leibundgut, Ch. und H. Wiesner (1990): »Markierversuch Rhein 09/90«, Oberrhein-Teilstrecke Weil bis Plittersdorf, Zwischenbericht der ersten Meßergebnisse; Institut für Physische Geographie, Lehrstuhl für Hydrologie, Universität Freiburg, November 1990
- Leibundgut, Ch. und H. Wiesner (1992): »Markierversuch Rhein 06/91«, Abschlußbericht; Institut für Physische Geographie, Lehrstuhl für Hydrologie, Universität Freiburg, August 1992
- Leibundgut, Ch., J. Petermann und B. Schudel (1988): Markierversuch Rhein »Albbruck-Basel«, Beschaffung von Eingabedaten für ein Alarm- und Stofftransportmodell mittels Tracerunter-

suchungen; Universität Bern, Geographisches Institut, in Zusammenarbeit mit Naturaqua, Bern, Dezember 1988

Mazijk, A. van, P. Verwoerd und J.M.C. van Mierlo (1991): Kalibrierung des Alarmmodells für den Rhein anhand des Markierversuchs 04/89 Village Neuf - Niederlande; Technische Universität Delft, Fachgruppe Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung, März 1991

Mazijk, A. van und J.M.C. van Mierlo (1992): Überprüfung der Kalibrierung des Rheinalarmmodells Version 2.1 anhand des Markierversuchs 04/89 Village Neuf - Niederlande; Technische Universität Delft, Fachgruppe Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung und Universität Freiburg, Institut für Physische Geographie, Lehrstuhl für Hydrologie, Dezember 1992

Mazijk, A. van, J.M.C. van Mierlo, H. Wiesner und Ch. Leibundgut (1992): Verifikation des Rheinalarmmodells anhand der Markierversuche 06/91 und 07/91; Technische Universität Delft, Fachgruppe Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung und Universität Freiburg, Institut für Physische Geographie, Lehrstuhl für Hydrologie, Dezember 1992

Petermann, J., B. Schudel, Ch. Leibundgut, M. Gossauer und D. Morgenthaler (1989): Markierversuch Rhein »Rheinau-Basel«, Beschaffung von Eingabedaten für ein Alarm- und Stofftransportmodell mittels Traceruntersuchungen; Universität Bern, Geographisches Institut, in Zusammenarbeit mit Naturaqua, Bern, September 1989

Schudel, B. und J. Petermann (1991): Tracerexperimente im Hochrhein. In: Fließzeitbestimmung und Stofftransportuntersuchungen im Rhein, Mitteilung Nr. 13 der Landeshydrologie und -geologie, Bern

Schudel, B. und J. Petermann (1991): Fließzeitbestimmung mittels Tracer experimenten. In: Fließzeitbestimmung und Stofftransportuntersuchungen im Rhein, Mitteilung Nr. 13 der Landeshydrologie und -geologie, Bern

Service de la Navigation de Strasbourg (1989): Essai de traçage du novembre 1988, Strasbourg, (unveröffentlichte lose Datensammlung)

Service de la Navigation de Strasbourg (1990): 15 mai 1990, Traçage sur le Rhin, rapport; Strasbourg

Steinebach, G. und H. Hanisch (1991): Tracerversuche und mathematische Modelle zur Beschreibung des Stofftransportes im Rhein; Bundesanstalt für Gewässerkunde, BfG0626, Koblenz

5. DAS ALARMMODELL RHEIN

A. van Mazijk

Technische Universität Delft, Fakultät für zivile Technik, Fachgruppe Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung

5.1. Einleitung

Der Rijkswaterstaat, Staatliches Amt für Integralverwaltung der Binnengewässer und für Abwasserreinigung RIZA in Lelystad, erstellte auf Basis eines vom »Waterloopkundig Laboratorium« in Delft entwickelten Fließzeitenmodells das Alarmmodell für den Rhein, Version 1.0 [Griffioen, 1989]. In dieser Version 1.0 wurde auf Grund von Fließzeiten der Konzentrationsverlauf an einer beliebigen Stelle berechnet. Die Eingabemöglichkeiten waren darin:

- eine momentane Einspeisung,
- eine kontinuierliche Einspeisung oder
- ein Konzentrationsverlauf.

Der Abbau des eingeleiteten Stoffes konnte durch Eingabe eines Abbaukoeffizienten berücksichtigt werden. Die longitudinale Ausdehnung der Stoffwolke wurde durch eine vorläufige, nicht kalibrierte Formulierung des Dispersionskoeffizienten wiedergegeben. Das Modell umfaßte den Rhein vom Pegel Kembs (Fluß-km 173,6) bis zu den Pegeln Vuren (Waal, Fluß-km 951,8), Hagestein (Lek, Fluß-km 946,5) und Kampen (IJssel, Fluß-km 994,5). Die Nebenflüsse Main, Neckar und Mosel waren provisorisch eingebaut. Diese noch unkalibrierte Version 1.0 wurde Ende 1988 fertiggestellt und in den verschiedenen »Warn- und Alarmstellen« entlang des Rheins installiert.

Eine Empfindlichkeitsanalyse der Version 1.0 [Van Mazijk et al., 1989] ergab einige Empfehlungen zur Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit des Konzentrationsverlaufs. Die wichtigste Empfehlung aus der Empfindlichkeitsanalyse galt der Anpassung des Berechnungsverfahrens bezüglich des Einflusses von Stillwasserzonen auf den Konzentrationsverlauf. Als Stillwasserzonen werden Bereiche mit annähernd stehendem Wasser, bzw. Bereiche ohne Nettoströmung bezeichnet, wie sie im Querschnitt natürlicher Wasserläufe auftreten. Diese Stillwasserzonen sind entlang der Sohle und der Ufer eines Flusses beliebig verteilt. Sie können auf natürliche Weise (Mäandrierung des Flusses, Vegetation usw.) oder durch Eingriffe des Menschen (Buhnenfelder o.ä.) entstehen (Abb. 5.1.1). Infolge des Stoffaustausches zwischen abflußwirksamen und stagnanten Teil des Querschnittes kommt es zur Abflachung und Verzögerung der Verunreinigungswelle, sowie zu einem asymmetrischen Konzentrationsverlauf (Schiefe) (Abb. 5.1.2).

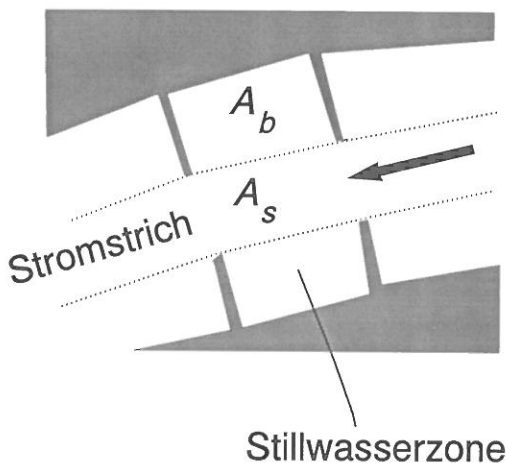


Abb. 5.1.1 Stillwasserzonen durch Buhnenfelder

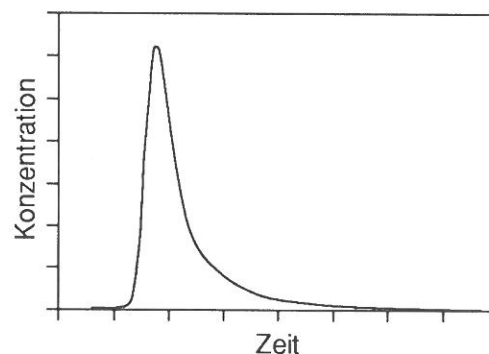


Abb. 5.1.2 Schiefe einer Konzentrationsverteilung

Bezüglich des Einflusses von Abflußschwankungen auf die Ankunftszeit und die Konzentrationsverteilung einer Verunreinigungswelle ergab die Empfindlichkeitsanalyse, daß für eine optimale Vorhersage der Ankunftszeit, der aktuelle Abfluß am Ort der Verunreinigung angesetzt werden muß. Da die Eingabe

der hydrologischen Daten gemäß den Wasserstandsmeßstellen am Rhein erfolgt, wird diese Bedingung vom Modell gewährleistet. Die Voraussetzung ist jedoch, daß während des Transportes die jeweiligen Daten fortwährend aktualisiert werden.

Die Version 2.0 unterscheidet sich von der Version 1.0 durch:

- die Anpassung des Berechnungsverfahrens bezüglich des Einflusses von Stillwasserzonen auf den Konzentrationsverlauf;
- eine erweiterte Formulierung des Dispersionskoeffizienten;
- die Erweiterung des Modells um die Hochrheinstrecke bis Stein am Rhein (Fluß-km 24,7) und einen provisorischen Einbau der Aare;
- die Ersetzung des provisorischen Einbaus der Mosel durch eine, aufgrund von Fließzeitberechnungen der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz [Adler 1990], verbesserte Eingabe der deutschen Moselstrecke;
- die Möglichkeit angeben zu können, ob es sich bei einem eingeleiteten Stoff um einen Schwimmstoff handelt.

Die Version 2.0 wurde 1990 anhand der Daten der folgenden Markierversuche kalibriert:

- 04/89 Village-Neuf - Niederlande
- 09/88 Albruck - Basel und
- 07/89 Rheinau - Basel.

Die Verifikation des Rheinalarmmodells Version 2.0 erfolgte im Frühjahr 1991 anhand der Markierversuche:

- 09/90 Village Neuf - Niederlande
- 11/88 Basel - Straßburg und
- 05/90 Basel - Niederlande.

Die Version 2.0 wurde im Frühjahr 1991 bei den verschiedenen »Warn- und Alarmstellen« entlang des Rheins installiert und in dem Bericht »Rheinalarmmodell Version 2.0, Kalibrierung und Verifikation« ausführlich dokumentiert [Van Mazijk et al., 1991].

Version 2.1 beinhaltet folgende Verbesserungen, beziehungsweise Anpassungen:

- die bei der Anwendung von Version 2.0 festgestellten programm-technischen Fehler wurden behoben,
- aufgrund von Querprofilmessungen, durchgeführt von der Bundesanstalt für Gewässerkunde in Koblenz, konnten die Daten der Flußbreiten auf der deutschen Rheinstrecke aktualisiert werden,
- die Q/H-Beziehungen der Wasserstandsmeßstellen Rheinfelden und Lobith, sowie die Abflußverteilung über die niederländischen Rheinabschnitte Waal, IJssel und Lek, in Abhängigkeit der Wasserstandsmeßstelle Lobith, wurden erneuert.

Wegen dieser Anpassungen erfolgte eine Überprüfung der Kalibrierung anhand des Markierversuches Village-Neuf - Niederlande (04/89). Diese Überprüfung führte zu einigen geringfügigen Korrekturen der Werte der Dispersions- und Stillwasserparameter.

Eine Überprüfung der Kalibrierungsergebnisse für die Hochrheinstrecke führte in der Version 2.1 zu einer Anpassung der Modellschematisierung für diese Strecke, wodurch eine Neukalibrierung notwendig wurde [Van Mazijk, 1992]. Zur Neukalibrierung wurden die Daten des Markierversuches 07/89 benutzt, und zur Verifikation die Daten des Markierversuches 09/88.

Zum Schluß wurden in Version 2.1 die folgenden Erweiterungen durchgeführt:

- aufgrund von Fließzeitberechnungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, im Auftrag der Landeshydrologie und -geologie, Bern [1992] wurde der bis dahin provisorische Einbau der Aare durch einen für die Strecke Bielersee bis zur Einmündung in den Rhein gültigen Modellzweig ersetzt;
- bei der Darstellung des berechneten Konzentrationsverlaufs an einem beliebigen Beobachtungspunkt wird nicht nur der Zeitpunkt des Konzentrationsmaximums, sondern auch Anfangszeit und Dauer der Durchgangskurve angegeben;
- für eine eventuelle weitere Bearbeitung der Konzentrationskurve besteht die Option, die diesbezügliche Zeit-Konzentrations-Datenreihe in einer gesonderten Datei zu speichern;
- der Transport eines eingeleiteten Stoffes im Rhein läßt sich in Form einer bewegten Graphik darstellen. Hierfür erscheint auf dem Bildschirm eine Karte des Rheinverlaufs mit den in das

Alarmmodell integrierten Nebenflüssen, die den Verlauf der Fortbewegung und Ausdehnung einer Stoffwolke verfolgen läßt.

Die Verifikation des Rheinalarmmodells Version 2.1 erfolgte anhand der Daten zweier Markierversuche:

- 06/91 Village Neuf - Niederlande
- 07/91 Basel - Bimmen

Zudem wurde die Version 2.1 nochmals anhand der Daten des Markierversuchs

- 09/90 Village Neuf - Niederlande
- verifiziert.

5.2 Mathematische Modellentwicklung

5.2.1 Taylor-Modell (Version 1.0)

In Version 1.0 wird die Konzentrationsberechnung mit Hilfe der analytischen Taylor-Lösung der zugrundeliegenden partiellen Differentialgleichung durchgeführt. Bei einer stationären, gleichförmigen Strömung (das heißt, daß die Fließgeschwindigkeit u_s , der Abfluß Q und der abflußwirksame Querschnitt A_s konstant sind) lautet diese Lösung für eine momentane Einleitung einer Stoffmenge M :

$$\phi_o(L,t) = \frac{M/Q}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot D_o \cdot t/u_s^2}} \cdot \exp \left[- \frac{(t - L/u_s)^2}{4 \cdot D_o \cdot t/u_s^2} \right] \quad (5.2.1)$$

mit: ϕ_o	= Konzentration	[kg/m ³]
t	= Zeit	[s]
L	= Distanz zwischen Einleitungsstelle und Beobachtungs- oder Berechnungspunkt	[m]
u_s	= mittlere Fließgeschwindigkeit im abflußwirksamen Teil des Flußquerschnittes	[m/s]
D_o	= longitudinaler Dispersionskoeffizient	[m ² /s]
Q	= $A_s \cdot u_s$	

Für den Abbau bei nicht konservativen Stoffen wird Gl.(5.2.1) multipliziert mit $\exp(-k \cdot t)$, worin k der Abbaukoeffizient ist. In den nachfolgenden Formeln wird dieser Abbaubau nicht weiter mitgetragen.

Für den Dispersionskoeffizienten D_o in natürlichen Flüssen leitet Fischer et al. [1979] die folgende semi-empirische Formel her:

$$D_o = \alpha \cdot \frac{u_s^2 \cdot B_s^2}{a \cdot u_*} \quad (5.2.2)$$

mit: α	= dimensionslose Proportionalitätskonstante	[-]
B_s	= Breite des Stromstriches	[m]
a	= mittlere Wassertiefe des Flusses	[m]
u_*	= Schubspannungsgeschwindigkeit	[m/s]

Für die Schubspannungsgeschwindigkeit u_* gilt:

$$u_* = \frac{u_s \cdot \sqrt{g}}{C} \quad (5.2.3)$$

mit: g	= Schwerkraftbeschleunigung	[m/s ²]
C	= Chézy-Koeffizient	[m ^{1/2} /s]

Der Chézy-Koeffizient C wird im Alarmmodell mit der folgenden Formel berechnet:

$$C = 25 \cdot \left[\frac{a}{k_n} \right]^{\frac{1}{6}} \quad (5.2.4)$$

mit: k_n = Konstante von Nikuradse (für den Rhein $k_n = 0,2 \text{ m}^{-2}$)

Für die Version 1.0 wurde nicht die Formulierung des Dispersionskoeffizienten nach Fischer (Gl.5.2.2), sondern eine Beschreibung als Funktion des Abflusses und der Fließgeschwindigkeit gewählt [Griffioen, 1989]:

$$D_o = \Omega \cdot u_s \cdot Q \quad (5.2.5)$$

mit: Ω = Konstante (= 0,075) [-]

Die Formulierung des Dispersionskoeffizienten nach Fischer ist ab Version 2.0 Bestandteil des Rheinalarmmodells.

Es wäre allerdings eine zu grobe Annäherung, den Rhein und seine Nebenflüsse zu einem Fluß mit konstantem Abfluß und Querschnitt zu schematisieren. Eine analytische Methode, um Gleichung 5.2.1, bei einer wie im Kapitel 3 besprochenen Aufteilung des Flusses in Teilabschnitte, anwenden zu können, geben Gelhar & Collins [1971]. Die von ihnen verwendete Methode legt eine Koordinatentransformation zu Grunde, durch welche ein einziger Mittelwert für die Fließgeschwindigkeit \bar{u} und den Dispersionskoeffizienten \bar{D}_o entsteht. Auch bei unterschiedlichen Werten der Fließgeschwindigkeiten und der Dispersionskoeffizienten pro Teilabschnitt gelten diese Werte als repräsentativ für die gesamte betrachtete Strecke. Das Ergebnis der Transformation wird durch zwei Integrale

* für die Fließzeit $L/u_s = T(x)$, mit $x = L$ und

* den Dispersionskoeffizienten in der zusammengesetzten Form von $D_o \cdot t/u_s^2 = \bar{D}(t)$ erzielt.

Die Fließzeit von der Einleitungsstelle x_o bis zu einem willkürlichen Beobachtungs-, bzw. Berechnungspunkt x wird definiert durch:

$$T(x) = \int_{x_o}^x \left[\frac{1}{u(x)} \right] dx \quad (5.2.6)$$

und der »zusammengesetzte« Dispersionskoeffizient $\bar{D}(t)$ durch:

$$\bar{D}(t) = \int_{x_o}^{x_c(t)} \left[\frac{D_o(x)}{[u(x)]^3} \right] dx \quad (5.2.7)$$

wobei $x_c(t)$ die Ortskoordinate ist, die dem Mittelwert (= μ) des Konzentrationsverlaufs zum Zeitpunkt t entspricht:

$$x_c(t) = x_o + \int_0^t u [x_c(\tau)] d\tau \quad (5.2.8)$$

Unter Anwendung der Gleichungen 5.2.6 bis 5.2.8 ergibt sich danach Gleichung 5.2.1 zu:

²⁾ Auf Grund von Wasserspiegellagenberechnungen der Bundesanstalt für Gewässerkunde in Koblenz, stellte sich heraus, daß $k_n \approx 0,35 \text{ m}$. Weil dies nach Gl.5.2.4 nur 10% Änderung des C-Wertes bedeutet, wurde der k_n -Wert im Modell nicht angepaßt.

$$\phi_o(x,t) = \frac{M/Q}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot D(t)}} \cdot \exp \left[- \frac{(t - T(x))^2}{4 \cdot D(t)} \right] \quad (5.2.9)$$

$T(x)$ und $D(t)$ sind in den Gleichungen 5.2.6 und 5.2.7 als Integrale definiert. Wie im Kapitel 3 beschrieben, werden der Rhein und seine Nebenflüsse in eine Reihe von Teilabschnitten untergliedert. Die Integrale müssen demnach durch eine Summierung über diese Teilabschnitte angenähert werden. $T(x)$ und $D(t)$ sind beide vom Abfluß abhängig und werden von der Fließgeschwindigkeit und dem Dispersionskoeffizienten bestimmt.

5.2.2 Stillwasserzonenmodell (Version 2.0 und 2.1)

Um die Auswirkung der gegebenen Stillwasserzonen in die Berechnung des Konzentrationsverlaufs an einem bestimmten Punkt $x = L$ einbeziehen zu können, wird die Annäherung eines Konzentrationsverlaufs, wie von Chatwin [1980] aufgrund des 0. bis 3. Momentes eines Konzentrationsverlaufs vorgeschlagen, angewandt. Die Ausarbeitung der Momente eines Konzentrationsverlaufs nach Nordin & Troutman [1980] zeigt, daß sich diese Annäherung wie folgt umschreiben läßt [Van Mazijk et al., 1991]:

$$\phi_E(L,t) = \frac{M/Q}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot D_o \cdot t/c^2}} \cdot \exp \left[- \frac{(t-L/c)^2}{4 \cdot D_o \cdot t/c^2} \right] \cdot \left[1 + \frac{G_1}{6} \cdot H_3 \left(\frac{t-L/c}{\sqrt{2 \cdot D_o \cdot t/c^2}} \right) \right] \quad (5.2.10)$$

mit: $H_3(z) = z^3 - 3 \cdot z$ (3. Hermitesches Polynom) [-]

$$\text{mit } z = (t - L/c) / \sqrt{2 \cdot D_o \cdot t/c^2}$$

c = Stofftransportgeschwindigkeit [m/s]

G_1 = Schiefekoeffizient ($G_1 = |g_1| / |\sigma_1^3|$) [-]

worin:

σ_1^2 = Varianz (2. Moment) [s²]

g_1 = 3. Moment [s³]

Merkmal dieser Rekonstruktion ist, daß die Momente des tatsächlichen Konzentrationsverlaufs $\phi(L,t)$ und der Annäherung $\phi_E(L,t)$ gleich groß sind. Voraussetzung für eine gute Übereinstimmung zwischen $\phi(L,t)$ und $\phi_E(L,t)$ ist, daß der absolute Wert des Schiefekoeffizienten G_1 nicht oder nur geringfügig größer als 1 ist. Als tatsächlicher Konzentrationsverlauf wird hier die Lösung der beiden Differentialgleichungen verstanden, durch die das Stillwasserzonenmodell definiert ist [vgl. Nordin & Troutman, 1980].

Die Stofftransportgeschwindigkeit c wird definiert durch:

$$c = \frac{u_s}{1 + \beta} \quad (5.2.11)$$

mit: β = markierter Stillwasserzonenanteil, der sich mit dem abflußwirksamen Teil des Flußquerschnittes austauscht (siehe auch Abb. 5.2.1):

$$\beta = \kappa \cdot \frac{A_b}{A_s} \quad (5.2.12)$$

mit: A_b = speichernder Flußquerschnitt (Stillwasserzone) [m²]

A_s = abflußwirksamer Flußquerschnitt [m²]

Wenn zwischen der Stillwasserzone und dem abflußwirksamen Teil des Flußquerschnittes ein vollständiger Austausch stattfindet und dessen Einfluß sich auf den Stofftransport völlig entwickelt hat, gilt $\kappa = 1$.

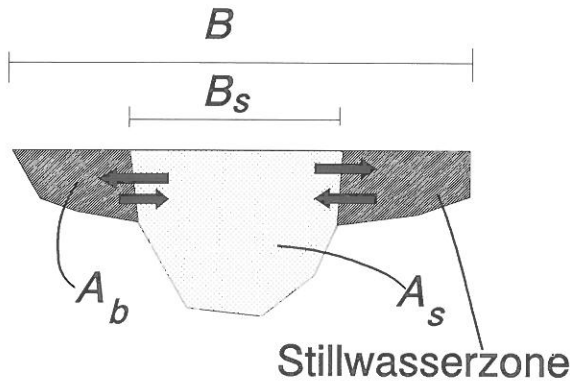


Abb. 5.2.1 Querschnitt eines Flusses.

In Gleichung 5.2.10 ist implizit der Einfluß der Stillwasserzone auf die Größe des Dispersionskoeffizienten (nach Gleichung 5.2.13 für den Dispersionskoeffizienten D_s des Stillwasserzonenmodells) wie folgt enthalten:

$$D_s = (1 + \beta)^2 \cdot D_o = (1 + \beta)^2 \cdot \alpha \cdot \frac{u_s^2 \cdot B_s^2}{a \cdot u_*} \quad (5.2.13)$$

Ein Vergleich der exakten analytischen Lösung nach Gleichung 5.2.1 und der Annäherung eines Konzentrationsverlaufs nach Gleichung 5.2.10 zeigt, daß letztere der exakten Lösung gleicht, sofern keine Stillwasserzonen vorhanden sind ($\beta = 0$) und keine Schiefe vorausgesetzt wird ($g = 0$).

Unter Berücksichtigung von Gleichung 5.2.10 ändert sich Gleichung 5.2.9 im Falle eines Stillwasserzonenmodells wie folgt:

$$\phi_E(x, t) = \frac{M/Q}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot \bar{D}_s(t)}} \cdot \exp \left[-\frac{(t - T_s(x))^2}{4 \cdot \bar{D}_s(t)} \right] \cdot \left[1 + \frac{1}{6} \cdot H_3 \left(\frac{t - T_s(x)}{\sqrt{2 \cdot \bar{D}_s(t)}} \right) \right] \quad (5.2.14)$$

- mit: ϕ_E = Konzentration nach dem Stillwasserzonenmodell
 T_s = Stofftransportzeit
 \bar{D}_s = zusammengesetzter Stillwasserzonen-Dispersionskoeffizient

Bei der Kalibrierung der Versionen 2.0 und 2.1 erfolgte keine nähere Bestimmung des Schiefefaktors G_s . Unter der Bedingung einer guten Übereinstimmung zwischen dem tatsächlichen Konzentrationsverlauf ϕ und der Annäherung ϕ_E , behielt man für G_s in Gleichung 5.2.14 den Wert 1 bei.

Bei der Ausarbeitung der analytischen Lösung für das Stillwasserzonenmodell nach Gleichung 5.2.14 (wie in Version 1.0), wird das Integral für die Stofftransportzeit definiert als:

$$T_s(x) = \int_{x_0}^x \left[\frac{1}{c(x)} \right] dx \quad (5.2.15)$$

und der »zusammengesetzte« Stillwasserzonen-Dispersionskoeffizient als:

$$\bar{D}_s(t) = \int_{x_0}^{x_0(t)} \left[\frac{D_o(x)}{[c(x)]^3} \right] dx \quad (5.2.16)$$

Für $T_s(x)$ und $D_s(t)$ gelten dieselben Erläuterungen wie in Absatz 5.2.1.

5.3 Kalibrierungs- und Verifikationsverfahren

5.3.1 Einführung

Bei der Kalibrierung des Rheinalarmmodells sind pro Teilabschnitt zwei Parameter zu bestimmen:

- der Stillwasserzonen-Parameter β , definiert nach Gleichung 5.2.11 und
- die Proportionalitätskonstante α im Ausdruck des Dispersionskoeffizienten nach Gleichung 5.2.2 bzw. Gleichung 5.2.13.

Das Rheinalarmmodell eignet sich für Kalibrierungen von Einleitungsstelle bis Beobachtungspunkt. Da die oben genannten Parameter pro Teilabschnitt zu bestimmen sind, wurden für eine erste Schätzung anhand der Daten des Markierversuches 04/89 die Ergebnisse des Stoffausbreitungsmodells Fließgewässer »SAMF« [Bremicker, 1989] verwendet. Mit diesem Modell werden Stofftransportgeschwindigkeiten und Dispersionskoeffizienten von Beobachtungspunkt zu Beobachtungspunkt berechnet. Als erste Schätzwerte aus dem schweizer Markierversuch 07/89 wurden die Berechnungsergebnisse der Universität Bern und des Planungsbüros Naturaqua herangezogen [Leibundgut et al., 1989].

Die Kalibrierung kann demnach in zwei Phasen unterteilt werden:

- (1) Eine erste Schätzung der α - und β -Werte anhand von abschnittsweise berechneten Stofftransportgeschwindigkeiten (c) und Dispersionskoeffizienten (D_s).
- (2) Eine genauere Ermittlung der α - und β -Werte durch einen Vergleich der gemessenen Konzentrationsverläufe mit den durch das Alarmmodell berechneten Verläufen.

Die Verifikation umfaßte den Vergleich gemessener und berechneter Konzentrationsverläufe, unter Anwendung der bei der Kalibrierung ermittelten α - und β -Werte.

5.3.2 Markierstoffmengen

Für Kalibrierung und Verifikation ist es erforderlich, den Abflußverlauf des Rheins während des Markierversuchs gut abzuschätzen. Die Ermittlung der tagesgemittelten Abschnittsabflüsse zur Zeit der Tracerpassage wurde in Kapitel 4 dargestellt, welches auch die damit vorgenommene Berechnung der jeweiligen Tracerfrachten erläutert. Zum korrekten Vergleich zwischen einem berechneten und einem gemessenen Konzentrationsverlauf bei Kalibrierung oder Verifikation, müssen die integrierten Markierstoffmengen in beiden Fällen gleich groß sein, weil im Modellansatz (Gl. 5.2.14) ein Abbau des Markierstoffes nicht berücksichtigt ist. Daher wird mit den nach Gleichung 4.1 ermittelten Tracerfrachten gerechnet.

Bei unvollständigen Querdurchmischungen zwischen markiertem und unmarkiertem Wasser, wie z.B. stromabwärts des Zustromes von Nebenflüssen, können die Werte der Rückgewinnungsrate, je nach Lage der Meßstelle im Flußquerschnitt, stark schwanken. Für die Ermittlung der Tracerrückgewinnung sollte dann im Prinzip nur ein Teil des Abflusses in Betracht gezogen werden. Die Eindimensionalität des Rheinalarmmodells setzt jedoch die Verwendung des gesamten Abflusses im diesbezüglichen Flußquerschnitt, und somit die nach Gleichung 4.1 ermittelte Tracerfracht als die in das Modell einzugebende Einspeisemenge voraus.

5.3.3 Kalibrierung der Parameter

Mit Hilfe der im Rheinalarmmodell verwendeten Fließzeittabellen kann die Fließgeschwindigkeit u_s bestimmt werden. Bei der Auswertung der Markierversuche wurden die Stofftransportgeschwindigkeiten c ermittelt. Aufgrund von Gleichung 5.2.11 berechnet man mit diesen Daten den Stillwasserzonen-Parameter β nach:

$$\beta = \frac{u_s}{c} - 1 \quad (5.3.1)$$

Ein weiteres Auswertungsergebnis der Markierversuche stellen die Dispersionskoeffizienten D_s dar. Nach Gleichung 5.2.2 wird der Dispersionskoeffizient D_0 des Alarmmodelles berechnet. Anhand der D_s -Werte lassen sich über die Gleichungen 5.2.3, 5.2.11 und 5.2.13 die jeweiligen Werte für α erheben:

$$\alpha = \frac{D_s}{(1 + \beta)^2} \cdot \frac{a \cdot u_*}{u_*^2 \cdot B_s^2} = \frac{D_s}{(1 + \beta)^3} \cdot \frac{a \cdot \sqrt{g}}{c \cdot B_s^2 \cdot C} \quad (5.3.2)$$

Für Strecken zwischen zwei aufeinanderfolgenden Beobachtungspunkten eines Markierversuches erfolgt nach den Gleichungen 5.3.2 und 5.3.3 eine erste Abschätzung der α - und β -Werte (1. Kalibrierungsphase). Nach Eingabe dieser Werte in die Datendateien der betreffenden Teilabschnitte des Rheinalarmmodells ist, für einen Markierversuch mit momentaner Einspeisung, der Konzentrationsverlauf vorherzusagen.

Anschließend wird der jeweils berechnete mit dem gemessenen Konzentrationsverlauf verglichen (2. Kalibrierungsphase). Dieser Vergleich erfolgt einerseits visuell durch die Darstellung der Meßwerte in der graphischen Wiedergabe des Konzentrationsverlaufs (siehe Abb. 5.3.1) und andererseits durch die Quantifizierung

- der Differenz der berechneten zu den gemessenen Stofftransportzeiten (bezogen auf das Konzentrationsmaximum), und
- der mittleren Abweichung der gemessenen zur berechneten Konzentration.

Die Differenz (in Prozent) zwischen gemessenen und berechneten Stofftransportzeiten (bezogen auf die gemessenen Zeiten) ergibt sich aus:

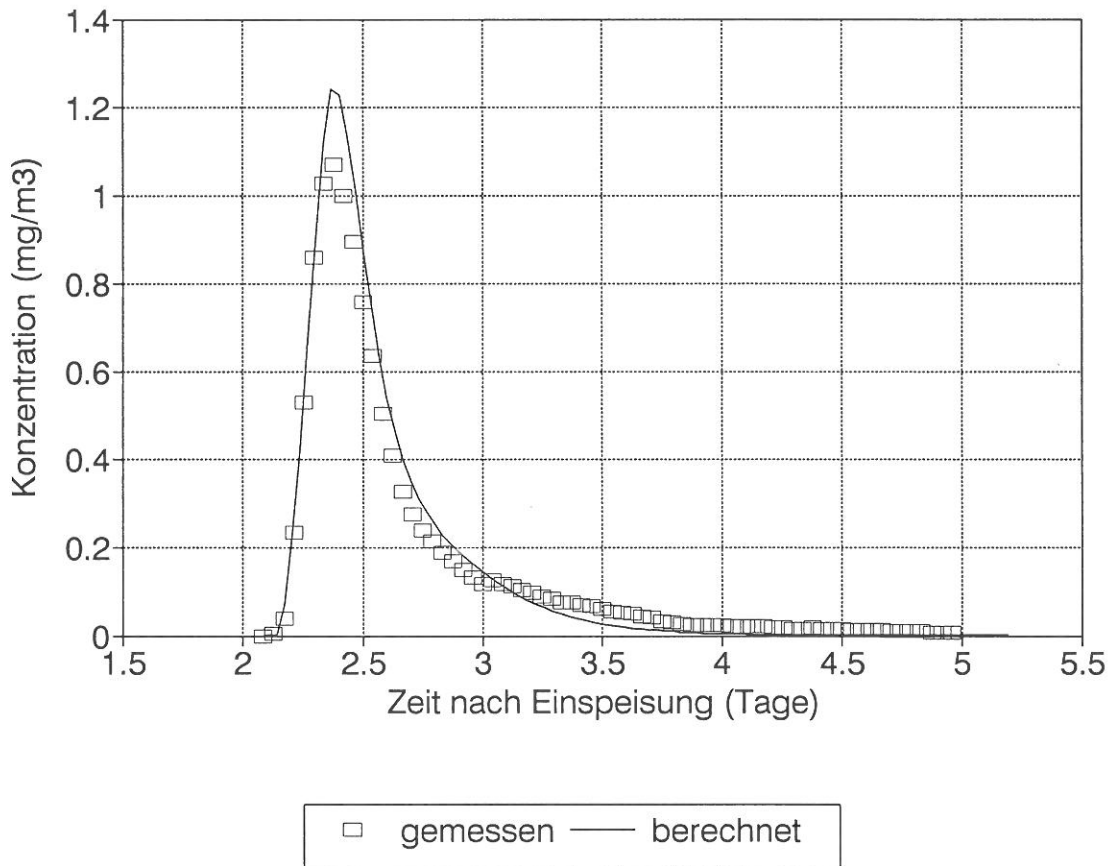


Abb. 5.3.1 Vergleich der berechneten und gemessenen Konzentrationsverläufe am Beobachtungspunkt Fluß-km 362, Markierversuch 04/89, nach der Kalibrierung

$$T_d = \frac{T_{gem} - T_{ber}}{T_{gem}} \cdot 100\% \quad (5.3.3)$$

mit: T_{gem} = gemessene Stofftransportzeit von Einspeisung bis Beobachtungspunkt [s]
 T_{ber} = berechnete Stofftransportzeit von Einspeisung bis Beobachtungspunkt [s]

Die mittlere Abweichung zwischen gemessener und berechneter Konzentration wird bestimmt nach:

$$\sigma = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\phi_{bi} - \phi_{mi}}{\phi_{bi}} \right)^2}{n} \right)^{1/2} \quad (5.3.4)$$

mit: σ = mittlere Abweichung [-]
 ϕ_{bi} = berechnete Konzentration zum Zeitpunkt t_i [kg/m³]
 ϕ_{mi} = gemessene Konzentration zum Zeitpunkt t_i [kg/m³]
 n = Anzahl der verglichenen Meßdaten [-]

Da für diesen Vergleich der Verlauf von Front und Maximum der Markierstoffwelle maßgebend sind, wurden zur Bestimmung des σ -Wertes nur Konzentrationswerte ϕ_{mi} größer als $0,3 \cdot (\phi_{bi})_{max}$ in Betracht gezogen, wobei $(\phi_{bi})_{max}$ der jeweils berechnete maximale Konzentrationswert ist. Auf diese Weise wird das »tailing« des gemessenen Tracerdurchgangs außer acht gelassen.

Die Optimierung der Parameter α und β erfolgte aus einer Minimierung der Ableitung von σ nach α bzw. β ($d\sigma/d\alpha$ bzw. $d\sigma/d\beta$). Für die Minimierung der Abweichung der berechneten hinsichtlich der gemessenen Stofftransportzeit des Markierstoffes, bezogen auf die maximale Konzentration, wurde eine Obergrenze von maximal 5% gesetzt.

Zur Optimierung des α -Wertes müssen, aufgrund der Nichtberücksichtigung des Stoffabbaus, die berechneten und die gemessenen Markierstoffmengen eines Beobachtungspunktes gleich groß sein. Für die Berechnung wird zum Vergleich des gemessenen und berechneten Konzentrationsverlaufs daher von einer eingespeisten Markierstoffmenge ausgegangen, die auf Grund gemessener Konzentrationen nach Gleichung 4.1 bestimmt wurde. Dabei sollen die Meßwerte die Durchgangskurve vollständig wiedergeben. Wenn dies nicht der Fall war, wurde die im Modell einzugebende, eingespeiste Menge so lange variiert, bis die berechnete Kurve die Meßwerte optimal reproduzierte. Da diese »Optimierung« der einzugebenden Modell-Menge zugleich die Form der berechneten Kurve beeinflusst, fand diese Mengen-Optimierung iterativ mit der Optimierung des α -Wertes statt.

Besonders die kalibrierten Werte des Stillwasserzonen-Parameters β enthalten implizit die Ungenauigkeiten der im Modell verwendeten Fließzeitablen und Abflüsse bzw. Wasserstände. So ist es möglich, daß sich aufgrund der ermittelten Stofftransportgeschwindigkeiten (c) negative β -Werte ergeben. Das heißt, daß die »gemessene« Stofftransportgeschwindigkeit größer als die mittlere Fließgeschwindigkeit ist. Dies ist physikalisch nur möglich, wenn sich der Markierstoff noch nicht völlig über den Flußquerschnitt ausgebreitet hat und sich hauptsächlich im Stromstrich befindet. Bei vollständiger Durchmischung kann ein negativer β -Wert auf falsche Eingabedaten in Bezug auf Fließzeiten und/oder Abflüsse deuten. In solchen Fällen wurde mangels näherer Informationen für β bei der weiteren Optimierung in der 2. Kalibrierungsphase der Wert Null beibehalten.

5.4 Kalibrierungsergebnisse

5.4.1 Kalibrierung der Hochrheinstrecke

In Tabelle 5.4.1 sind die ermittelten Werte des Proportionalitätskoeffizienten (Dispersionsfaktors) α und des Stillwasserzonen-Parameters β für die jeweiligen Teilabschnitte aufgelistet. Abbildung 5.4.1 zeigt die Ergebnisse in Abhängigkeit des Flußkilometers als graphische Dargestellung. Die negativen β -Werte direkt nach der Einspeisung deuten auf eine unvollständige Querdurchmischung hin. Anscheinend befindet sich hier der Markierstoff noch zum größten Teil in der Mitte des Stromstriches und wird dort mit einer größeren als der mittleren Strömungsgeschwindigkeit transportiert.

Table 5.4.1 Proportionalitätskonstante α des Dispersionskoeffizienten und Stillwasserzonenparameter β

Fluß	Teilabschnitts-nr.	α -Wert	β -Wert	Fluß	Teilabschnitts-nr.	α -Wert	β -Wert
RHEIN	8004	0,00140	-0,040	RHEIN	2301	0,01000	0,150
	8101	0,00140	-0,040		2401	0,01000	0,150
	8102	0,00120	-0,030		2402	0,01000	0,150
	8103	0,00160	0,000		2501	0,00900	0,000
	8104	0,00160	0,000		2502	0,00900	0,000
	8105	0,00160	0,000		2503	0,00900	0,000
	101	0,00100	0,280		2601	0,00900	0,000
	102	0,00100	-0,250		2602	0,00900	0,000
	103	0,00100	-0,100		2603	0,00900	0,000
	104	0,00300	0,100		2701	0,00900	0,000
	105	0,00300	0,100		2702	0,00900	0,000
	106	0,00020	0,000		2703	0,00900	0,000
	107	0,00020	-0,050		2801	0,00990	0,000
	108	0,00400	0,050		2802	0,00990	0,000
	109	0,00400	0,060		2901	0,00990	0,000
	201	0,00300	0,100		2902	0,00990	0,000
	301	0,00090	0,065	WAAL	3001	0,00990	0,000
	401	0,00300	0,100		3002	0,00990	0,000
	501	0,00330	0,100		3101	0,01100	0,100
	601	0,00090	0,065		3201	0,02300	0,180
	701	0,00350	0,200		3202	0,02300	0,180
	801	0,00330	0,100		3203	0,02300	0,180
	901	0,00090	0,065		3204	0,02300	0,180
	1001	0,00160	0,270		3205	0,02300	0,180
	1101	0,00330	0,100		3206	0,02300	0,180
	1201	0,00090	0,065		3207	0,02300	0,180
	1301	0,00400	-0,030	PANNERDENSCH	3301	0,02200	0,200
	1401	0,00330	0,100	KANAAL	3302	0,02200	0,200
	1501	0,00090	0,065	IJSSEL	3401	0,02150	0,000
	1602	0,01200	0,100		3402	0,02150	0,000
	1701	0,01700	0,120		3403	0,02150	0,000
	1702	0,01700	0,120		3404	0,02150	0,000
	1801	0,01300	0,000		3405	0,02150	0,000
	1901	0,01300	0,000		3406	0,02150	0,000
	1902	0,01300	0,000		3407	0,02150	0,000
	1903	0,01300	0,000		3408	0,02150	0,000
	2001	0,00250	0,340		3409	0,02150	0,000
	2002	0,00250	0,340	LEK	3501	0,02000	0,290
	2003	0,00250	0,340		3502	0,02000	0,290
	2004	0,00250	0,340		3503	0,02000	0,290
	2101	0,00400	0,115		3504	0,02000	0,290
	2102	0,00400	0,115		3505	0,02000	0,290
	2201	0,00900	0,000		3506	0,02000	0,290
	2202	0,00900	0,000		3507	0,02000	0,290
	2203	0,00900	0,000		3508	0,02000	0,290
	2204	0,00900	0,000		3509	0,02000	0,290
	2205	0,00900	0,000		3510	0,02000	0,290

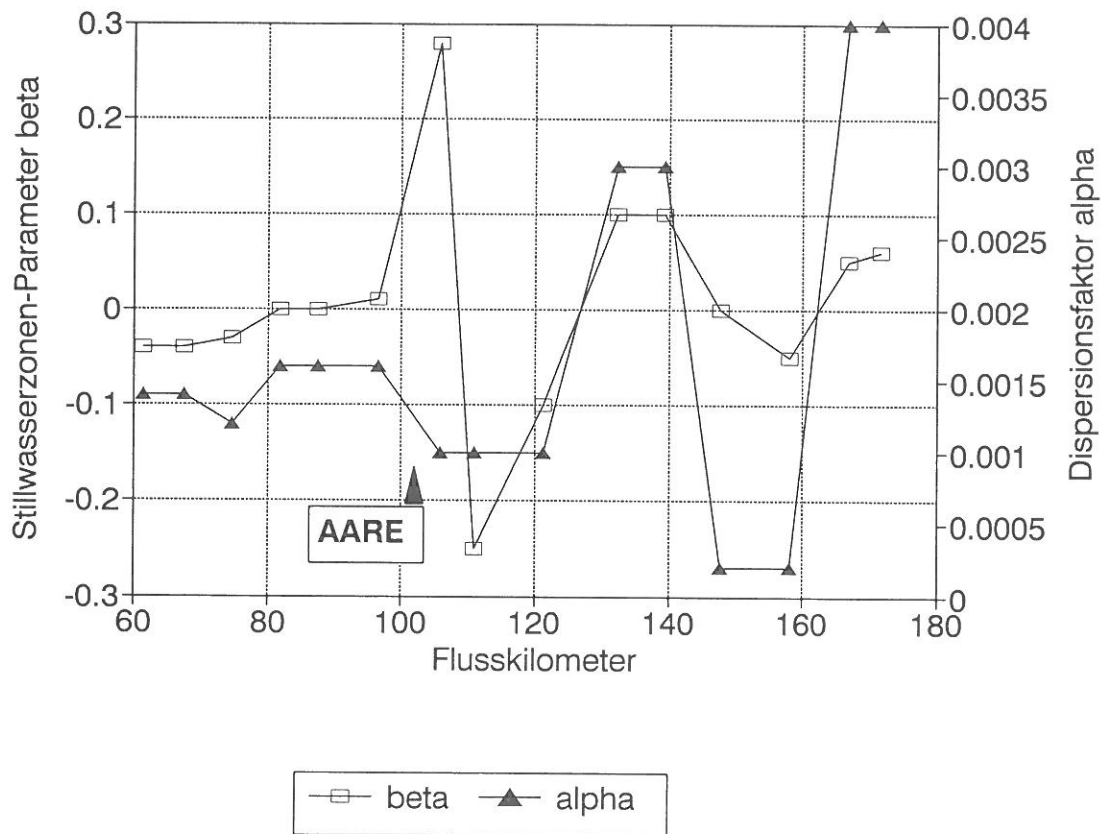


Abb. 5.4.1 Verlauf der α - und β -Werte zwischen Rheinau und Basel

Direkt stromabwärts der Aaremündung tritt eine große Verzögerung der Stofftransportgeschwindigkeit auf, was einem größeren β -Wert entspricht. Stromabwärts der Einmündung der Aare bis zum Kraftwerk Albbruck befindet sich der Markierstoff hauptsächlich am rechten Ufer [siehe Leibundgut u.a., 1989]. Auch hier besteht die Möglichkeit, wie bei dem Neckar, dem Main und der Mosel, daß gerade dadurch der Markierstoff mit einer niedrigeren Geschwindigkeit transportiert wurde, als auf Grund der mittleren Strömungsgeschwindigkeit zu erwarten wäre (siehe weiter Abschn. 5.4.2).

Die negativen β -Werte weiter stromabwärts könnten darauf hindeuten, daß die Markierstoffwelle sich infolge der Passage der Kraftwerke erneut in der Flußmitte befindet, wodurch die Transportgeschwindigkeit wiederum größer als die mittlere Strömungsgeschwindigkeit ist.

In Abb. 5.4.2 ist die prozentuale Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Stofftransportzeiten graphisch dargestellt. Die berechneten Stofftransportzeiten, bezogen auf die maximale Konzentration an den jeweiligen Beobachtungspunkten können wiederum mit einer hohen Genauigkeit von durchschnittlich weniger als 2% reproduziert werden.

Abbildung 5.4.3 gibt die ermittelten Dispersionskoeffizienten, jeweils bezogen auf die Strecke von der Einspeisung bis zum Beobachtungspunkt, graphisch wieder. Bei einer allgemeinen Betrachtung dieser Ergebnisse läßt sich ein leichter Anstieg des Dispersionskoeffizienten mit zunehmender Distanz zur Einspeisung (von circa 65 bis auf etwa 95 m^2/s) erkennen. Die Schwankungen in der Entwicklung des Koeffizienten könnten durch die Kraftwerke verursacht worden sein. Eine genauere Analyse dieses Parameters kann gegenwärtig aber nicht gegeben werden.

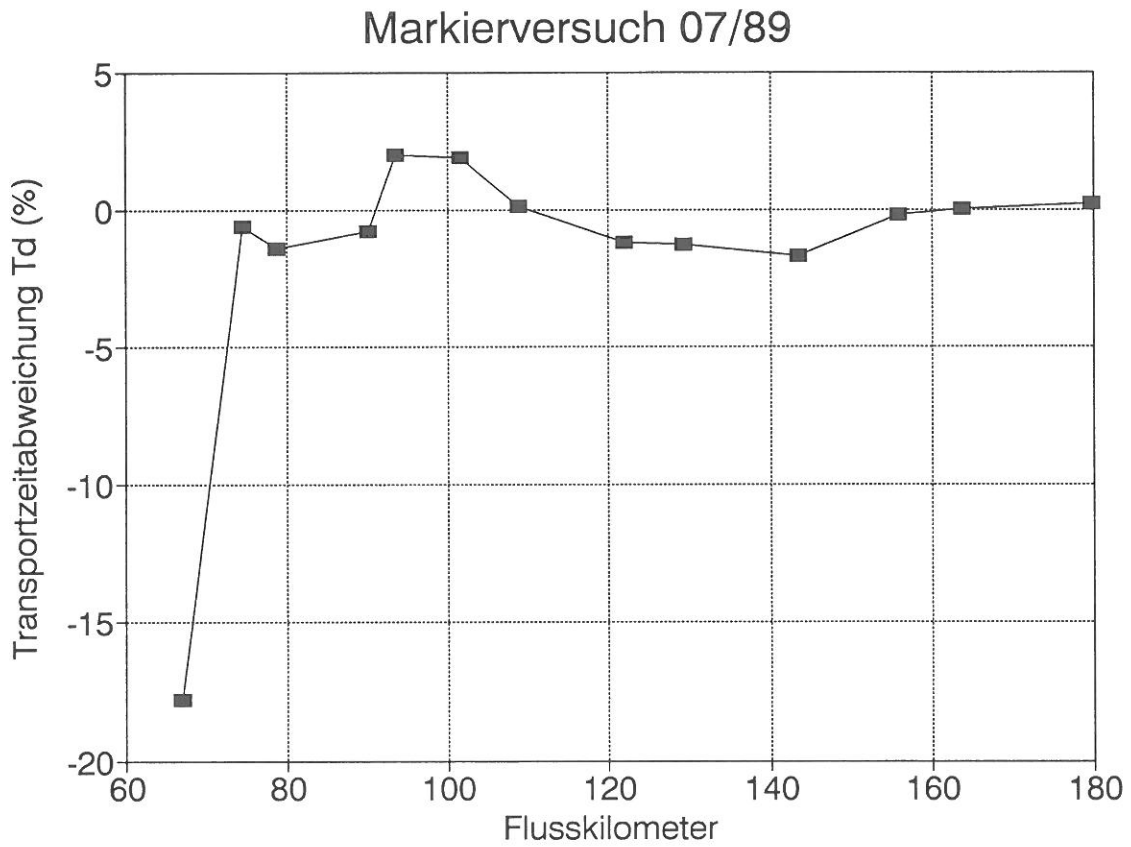


Abb. 5.4.2 Prozentuale Abweichung zwischen gemessener und berechneter Stofftransportzeit T_d nach Gl. (5.3.3)

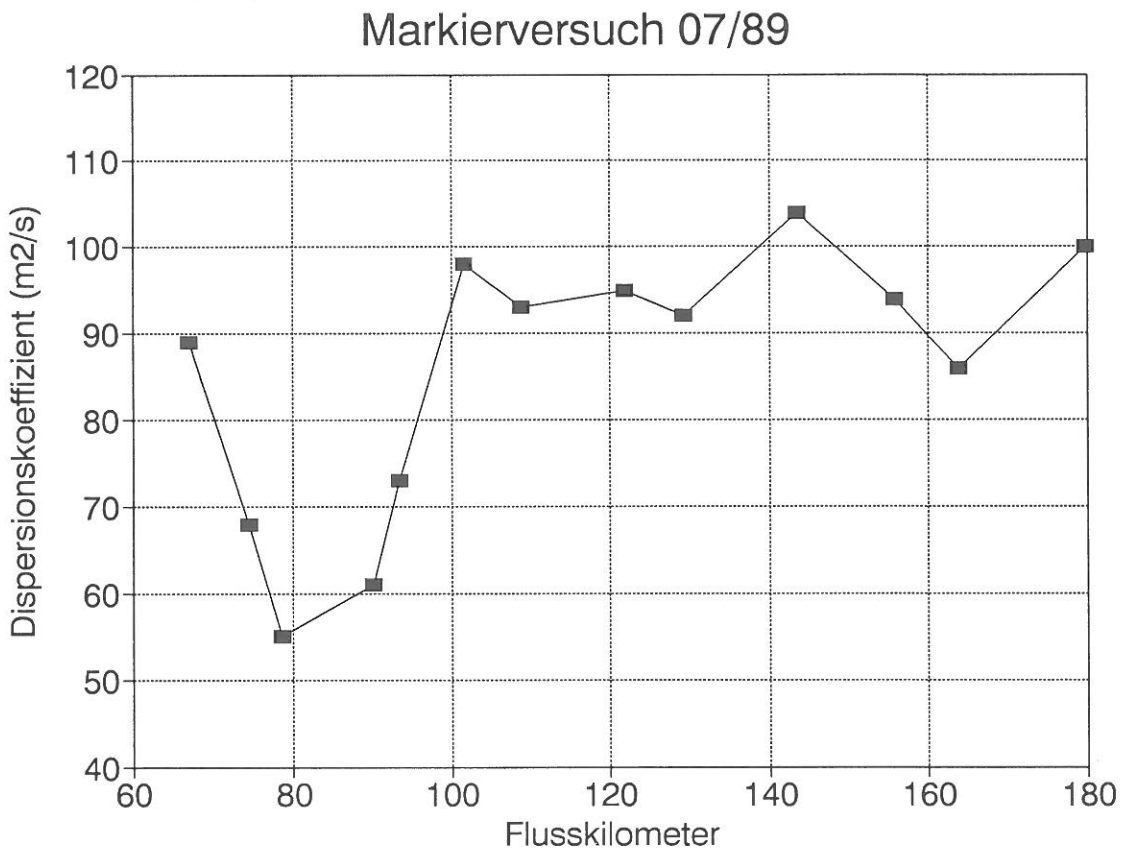


Abb. 5.4.3 Entwicklung des Dispersionskoeffizienten zwischen Rheinau und Basel

Für die kalibrierten α - und β -Werte werden in der Abbildung 5.4.4 die berechneten mit den gemessenen Konzentrationskurven der Beobachtungspunkte Kraftwerk Eglisau (Fluß-km 78,7), Kraftwerk Reckingen (Fluß-km 90,1), Kraftwerk Laufenburg (Fluß-km 122,0), Kraftwerk Riburg (Fluß-km 143,5) und Kraftwerk Birsfelden (Fluß-km 163,8) mit einander verglichen.

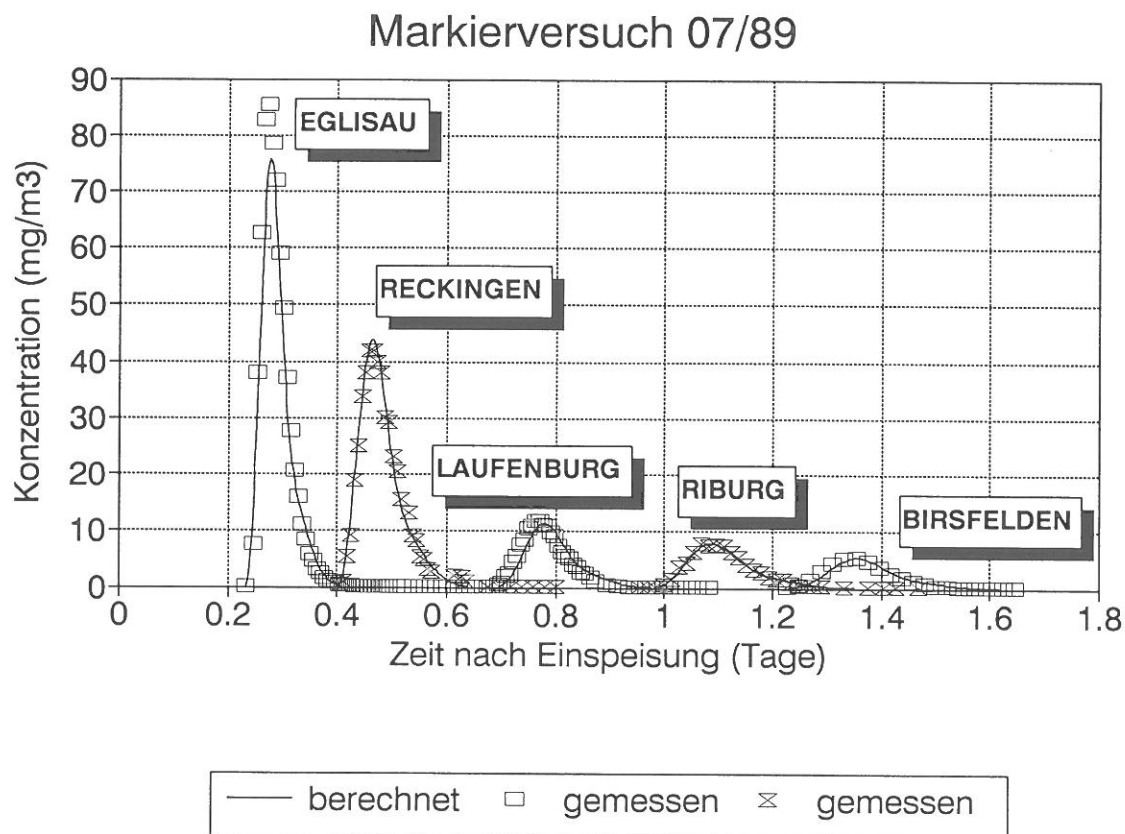


Abb. 5.4.4 Vergleich berechneter und gemessener Konzentrationsverläufe

Aus den exemplarisch dargestellten Vergleichen läßt sich erkennen, daß die Front der Markierstoffwelle an den jeweiligen Beobachtungspunkten gut reproduziert wird.

5.4.2 Kalibrierung der Ober-, Mittel- und Niederrheinstrecke

Der zur Kalibrierung der Ober-, Mittel- und Niederrheinstrecke herangezogene Markierversuch 04/89 mit seiner Untersuchungsstrecke von Village-Neuf bis in die Niederlande fand bei mittlerer Wasserführung des Rheins statt. Am Tag der Einspeisung belief sich der mittlere Tagesabfluß am Pegel Rheinfelden (Fluß-km 148,26) auf 1 170 m³/s. Nach einem geringfügigen Anstieg des Abflusses am zweiten Versuchstag zeigten die Werte an den Folgetagen eine leicht rückläufige Tendenz. Am Pegel Lobith (Fluß-km 862,2) betrug der mittlere Abfluß zur Zeit der Passage des Tracermaximums 2979 m³/s. (siehe auch Abb. 5.5.4)

In Tabelle 5.4.1 sind die ermittelten Werte des Proportionalitätskoeffizienten (Dispersionsfaktors) α und des Stillwasserzonen-Parameters β für die jeweiligen Teilabschnitte aufgelistet. Abbildung 5.4.5 zeigt die Ergebnisse in Abhängigkeit des Flußkilometers als graphische Darstellung. Für die niederländischen Verzweigungen des Rheins wurden hierfür exemplarisch die Ergebnisse der Waal ausgewählt.

Die α -Werte variieren von 0,0009 im Rheinseitenkanal bis 0,023 in den niederländischen Rheinverzweigungen. Daß der α -Wert für einen Kanal oder einen kanalisiertem Fluß um den Faktor zehn kleiner ist als der von Fischer et al. [1979] angegebene Wert von 0,011, stimmt auch mit den von van Craenenbroeck

[1984] erzielten Ergebnissen überein. Die für den freifließenden Rhein ermittelten Werte liegen innerhalb des Bereiches, wie er auch in der Literatur zu finden ist [Fischer et al. 1979].

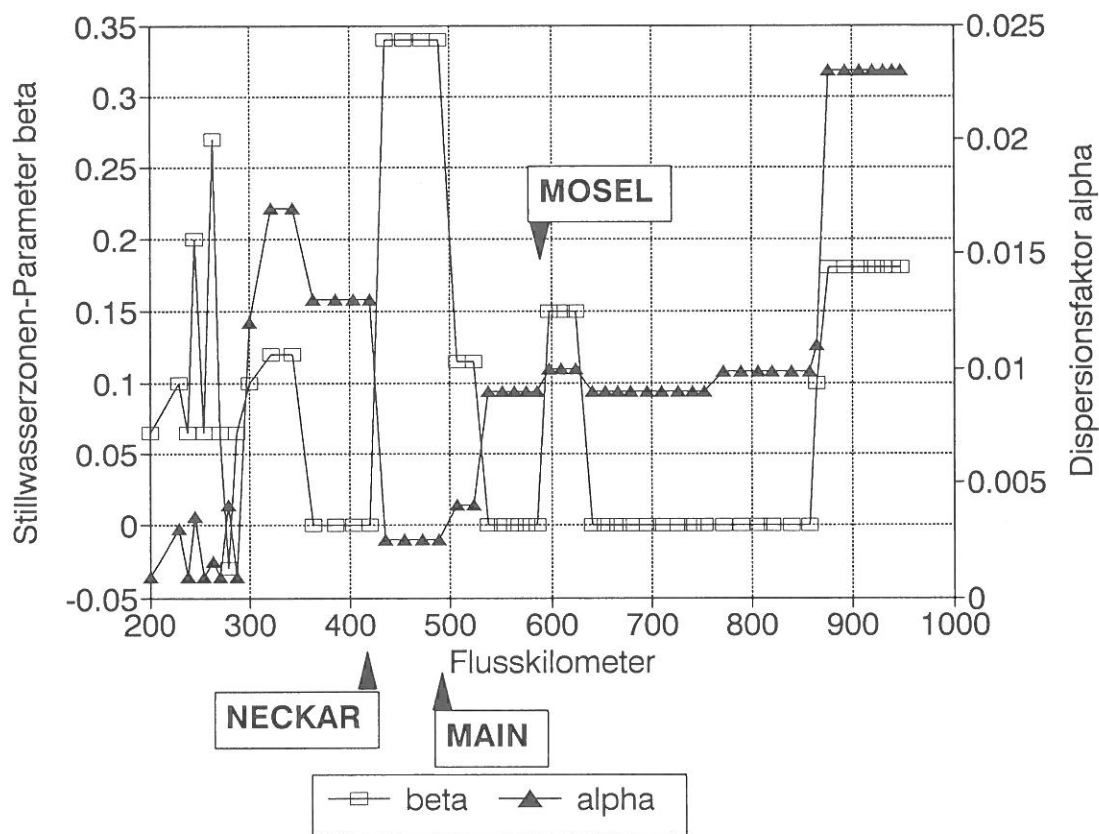


Abb. 5.4.5 Verlauf der α - und β -Werte zwischen Basel (Village-Neuf) und den Niederlanden (Vuren)

Die für den Stillwasserzonen-Parameter β ermittelten Werte liegen zwischen 0 und 0,35. Die höheren Werte errechnen sich in Prinzip in Flußstrecken mit Bühnenfeldern wie z.B. der Waal, dem Pannerdensch Kanaal und dem Lek. Voraussetzung für die höheren Werte bei Bühnenfeldern ist ein vollständig entwickelter Austausch zwischen der Stillwasserzone und dem abflußwirksamen Teil des Flußquerschnittes ($\kappa=1$ in Gl. 5.2.12). Diesbezüglich ist der Einfluß der Bühnenfelder auf die Stofftransportgeschwindigkeit, bezogen auf das Konzentrationsmaximum, im Mittel- und Niederrheinbereich bis Lobith mit durchschnittlich β -Werten gleich Null, bedeutend geringer ($\kappa \ll 1$). Inwiefern dies auch für die IJssel zutrifft, sollte durch eine detaillierte Analyse des Stofftransportes in diesem Rheinweig geklärt werden.

Außerdem könnte die geringe Zahl der zur Kalibrierung verwendbaren Beobachtungspunkte zwischen Bingen (Fluß-km 530,15) und Düsseldorf (Fluß-km 759,6) eine Ursache der ermittelten Nullwerte für β auf dieser Strecke sein. So wurde bei der Verifikation des Modells anhand der Daten des Markierversuches 06/91, wobei sich auf dieser Strecke die Beobachtungspunkte Koblenz (Fluß-km 590,35), Bad Honnef (Fluß-km 640) und Köln (Fluß-km 689,5) befanden, festgestellt, daß es eine bessere Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Durchgangskurven gab, wenn zwischen den Flußkilometern 592,5 und 634,0 ein β -Wert von 0,15 anstatt Null (ermittelt auf Grund der Kalibrierung anhand des Markierversuches 04/89), eingegeben wurde. Dabei stellte sich heraus, daß dieser erhöhte Wert für die Übereinstimmung zwischen den berechneten und den gemessenen Durchgangskurven des Markierversuches 04/89 vernachlässigbare Folgen hatte. Aufgrund dessen sind diese β -Werte für die Strecke von Flußkilometer 592,5 bis 634,0 als Kalibrierungsergebnis herangezogen worden.

Aus dem Verlauf des β -Wertes geht jetzt hervor, daß besonders stromabwärts der Nebenflüsse Neckar, Main und Mosel eine erhebliche Verzögerung in der Transportgeschwindigkeit auftritt (größere β -Werte, siehe Abb. 5.4.5). Es besteht die Möglichkeit, daß infolge der unvollständigen Querdurch-

mischung direkt stromabwärts von Nebenflüssen, in Zusammenhang mit dem Fließgeschwindigkeitsprofil, der Markierstoff mit einer niedrigeren Geschwindigkeit transportiert wurde, als auf Grund der mittleren Strömungsgeschwindigkeit zu erwarten wäre.

Negative β -Werte können nur infolge einer unvollständigen Querdurchmischung auftreten, wobei der Markierstoff sich hauptsächlich in der Mitte des Stromstriches befindet und deshalb mit einer größeren als der mittleren Strömungsgeschwindigkeit transportiert wird, wie z.B. kurz nach einer Einspeisung oder nach einem Kraftwerk.

Wie in Abbildung 5.4.6 zu erkennen, konnten die im Markierversuch 04/89 gemessenen Stofftransportzeiten durch die Kalibrierung der α - und β -Parameter, bezogen auf die maximale Konzentration an den jeweiligen Beobachtungspunkten, mit einer hohen Genauigkeit von durchschnittlich weniger als 2% reproduziert werden. Nach Gleichung 5.3.3 bedeuten negative Werte an dieser Stelle, daß die berechneten Stofftransportzeiten größer sind als die gemessenen.

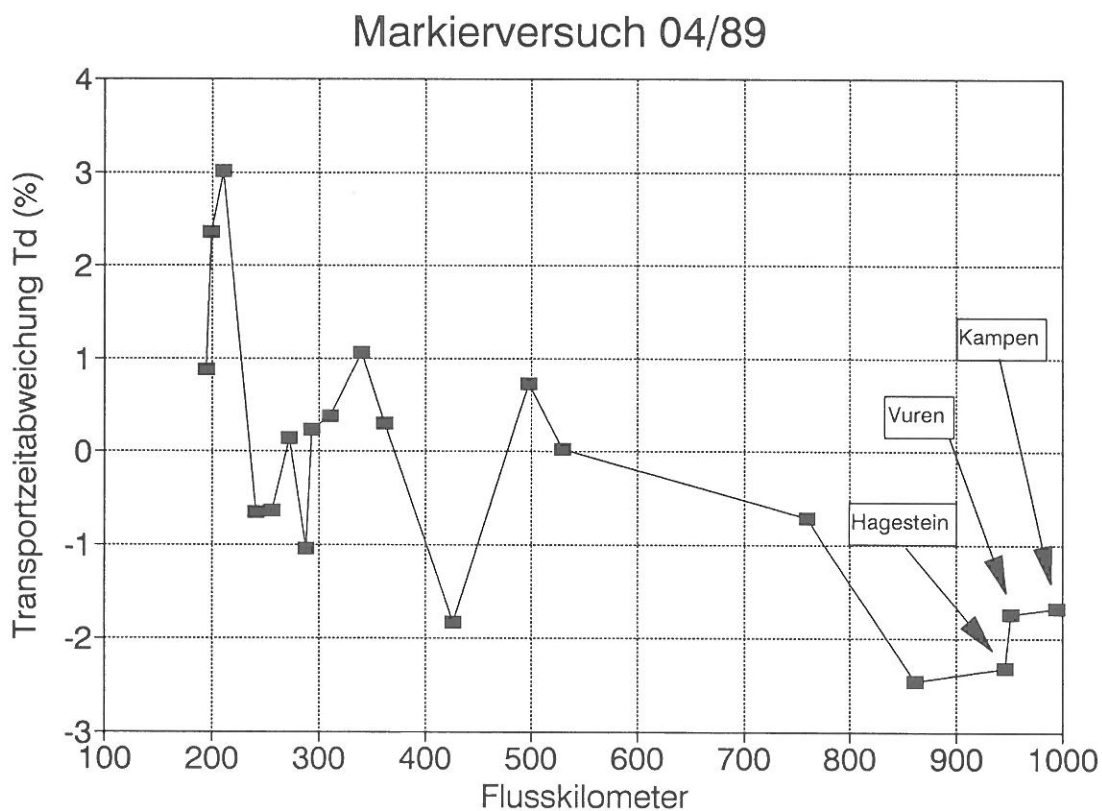


Abb. 5.4.6 Prozentuale Abweichung zwischen gemessener und berechneter Stofftransportzeit T_d nach Gl. (5.3.3)

In Abbildung 5.4.7 werden die ermittelten Dispersionskoeffizienten jeweils von Einleitungsstelle bis Beobachtungspunkt graphisch dargestellt. Für die Rheinzweige in den Niederlanden wurde ab Flußkilometer 867,2 beispielhaft nur die Waal eingetragen. Die Graphik belegt die zu erwartenden geringen Werte dieses Parameters im Bereich der mit Staustufen ausgebauten Oberrheinstrecke und seinen generellen Anstieg mit zunehmender Lauflänge.

Markierversuch 04/89

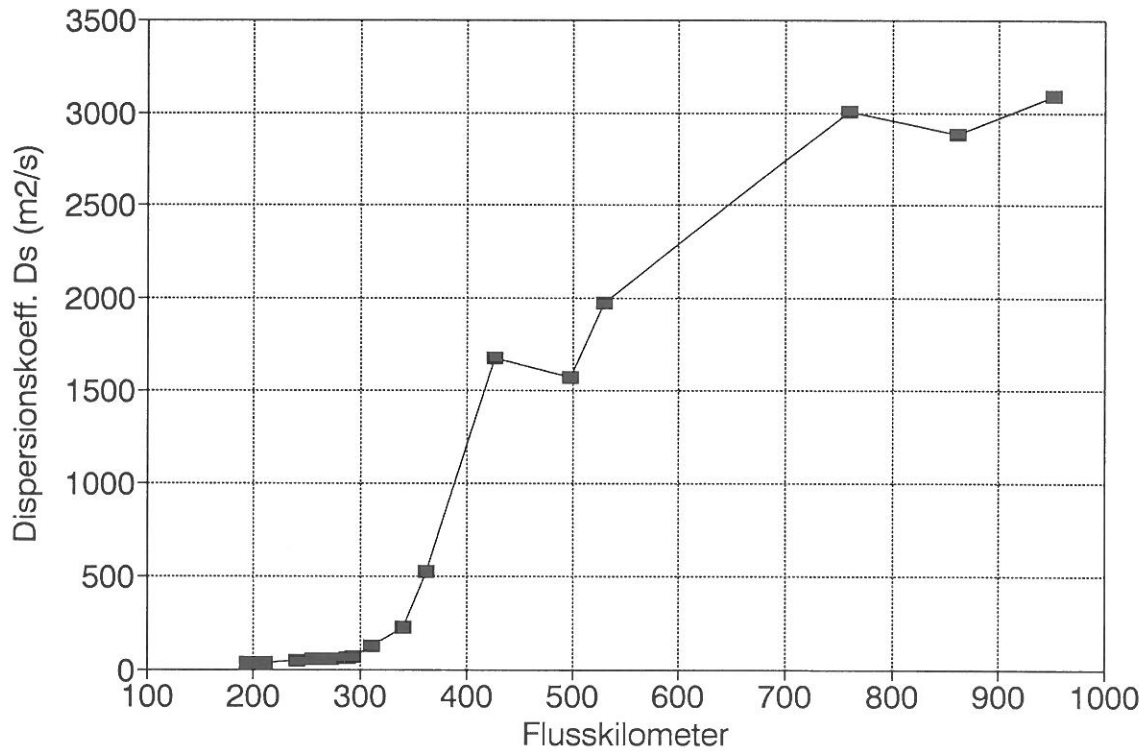


Abb. 5.4.7 Entwicklung des Dispersionskoeffizienten zwischen Basel und den Niederlanden

In Abbildung 5.4.8 werden für die Beobachtungspunkte Maximiliansau (Fluß-km 362,0), Bingen (Fluß-km 530,15), Düsseldorf (Fluß-km 759,6) und Lobith (Fluß-km 862,2) die gemessenen mit den berechneten Konzentrationsverläufen (nach der Kalibrierung, bzw. Optimierung der Parameter α und β) verglichen. Aus den exemplarisch dargestellten Vergleichen läßt sich erkennen, daß die Front der Markierstoffwelle an den jeweiligen Beobachtungspunkten gut reproduziert wird.

Anmerkung: Die gemessenen Durchgangskurven an den Beobachtungspunkten Bingen und Düsseldorf lassen eine Grundlast von $0,05 \mu\text{g/l}$ vermuten. Bei der Kalibrierung sind die diesbezüglichen Meßwerte daraufhin nicht korrigiert worden.

Markierversuch 04/89

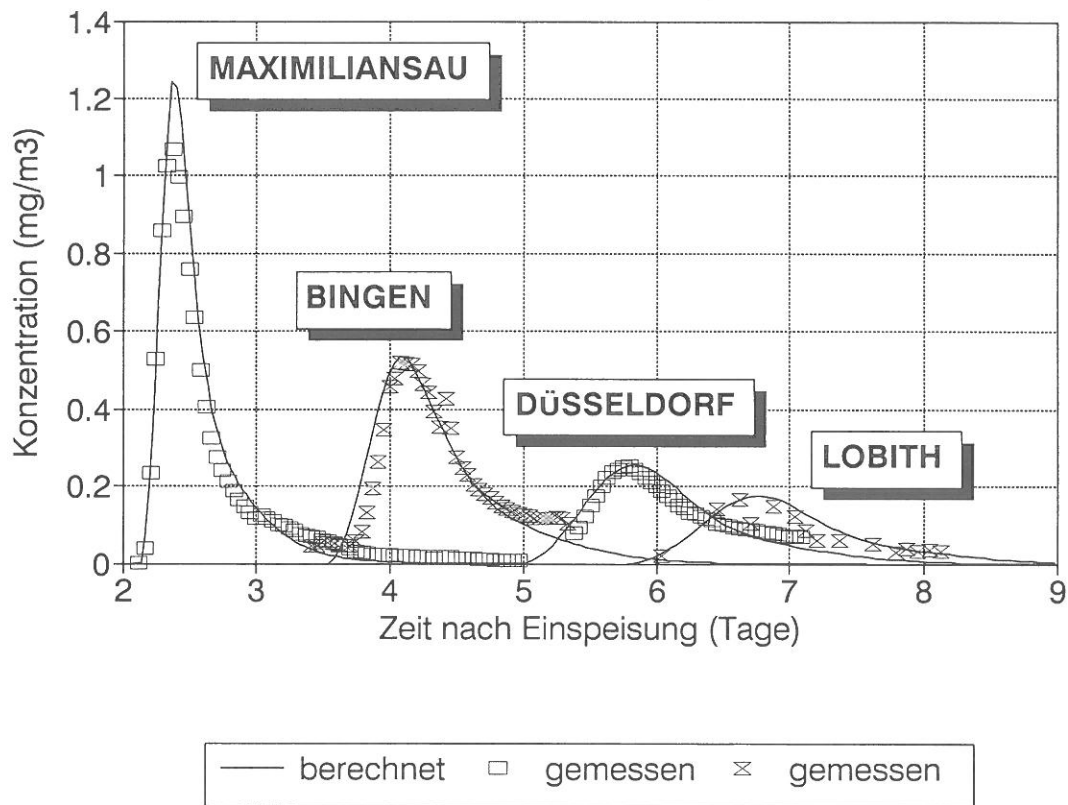


Abb. 5.4.8 Vergleich berechneter und gemessener Konzentrationsverläufe

5.5 Verifikationsergebnisse

5.5.1 Verifikation der Hochrheinstrecke

Zur Verifikation der Hochrheinstrecke wurden die Daten des Markierversuchs 09/88 Albrück-Basel herangezogen. Während des Markierversuchs wies der Abfluß eine leicht sinkende Tendenz auf. Am Tag der Einspeisung (27. September) belief sich der mittlere Tagesabfluß am Pegel Rheinfelden auf $712 \text{ m}^3/\text{s}$ und am 28. September betrug der mittlere Tagesabfluß $697 \text{ m}^3/\text{s}$. Deshalb wurde die Verifikation für die Abflußgrößen von 712 und $700 \text{ m}^3/\text{s}$ durchgeführt.

Abbildung 5.5.1 zeigt bei Abflüssen von 712 und $700 \text{ m}^3/\text{s}$ die prozentuale Abweichung zwischen diesen Transportzeiten nach Gl.(5.3.3). Aus diesen Ergebnissen ist zu schließen, daß die während des Markierversuches auftretende Abnahme des Abflusses von 712 auf $700 \text{ m}^3/\text{s}$ eine Herabsetzung der Stofftransportzeitabweichung von 1 bis 2% bedeutet. Die durchschnittliche Abweichung beträgt dabei weniger als 2% (ausgenommen Beobachtungspunkt Fluß-km 122).

Wie auf Grund der Abflußverringerung während des Versuches zu erwarten, werden bei den weiterstromabwärts vom Einspeisepunkt gelegenen Beobachtungspunkten die Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Konzentrationsverläufen bei einem Abfluß von $700 \text{ m}^3/\text{s}$ geringer.

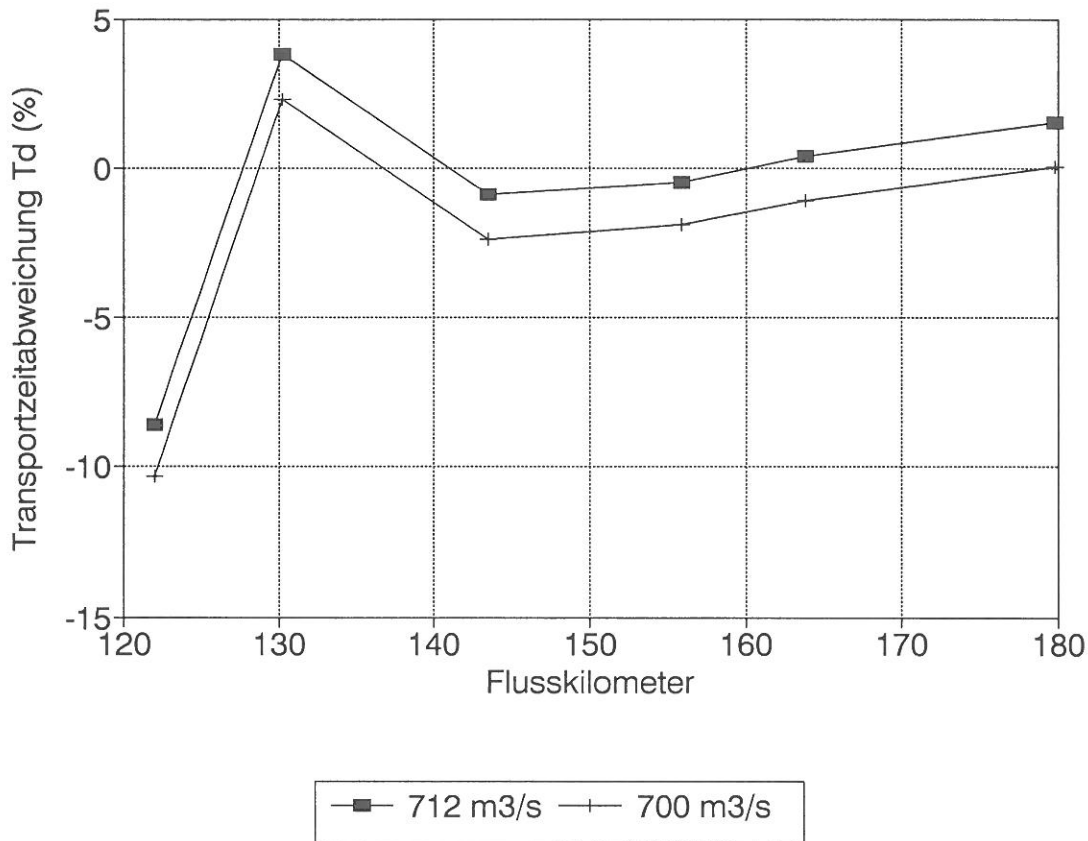


Abb. 5.5.1 Prozentuale Abweichung zwischen gemessener und berechneter Stofftransportzeit T_d nach Gl. (5.3.3)

Im Falle der größten Stofftransportzeitabweichung (8,6% bei Fluß-km 122) handelt es sich bei einer Transportzeit von 2,8 Stunden um eine Abweichung in der Ankunftszeit des Konzentrationsmaximums von circa 15 Minuten. Die Tatsache, daß der Markierstoff sich zu Beginn hauptsächlich im Stromstrich befindet und dadurch schneller als mit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit transportiert wird, könnte die Abweichung auf dieser noch verhältnismäßig kurzen Distanz zur Einspeisung erklären.

Es zeigte sich bei der Verifikation, daß die betrachteten unterschiedlichen Abflüsse von 700 und 712 m^3/s einen vernachlässigbaren Einfluß auf den Wert des Dispersionskoeffizienten haben. Abb. 5.5.2 gibt die Entwicklung des Koeffizienten ab Albrück wieder. Der Mittelwert auf der Versuchsstrecke liegt in der Größenordnung von 65 m^2/s . Er ist damit um ein Drittel kleiner als beim Markierversuch 07/89 mit einem mittleren Tagesabfluß von 1 068 m^3/s am Pegel Rheinfelden. Wegen der linearen Beziehung zwischen dem Dispersionskoeffizienten und der Fließgeschwindigkeit (siehe Gl.5.2.13) nimmt hier die Fließgeschwindigkeit anscheinend linear mit dem Abfluß ab.

In Abbildung 5.5.3 werden für die Beobachtungspunkte Holzbrücke Stein-Säckingen (Fluß-km 130,2), Kraftwerk Riburg-Schwörstadt (Fluß-km 143,5), Kraftwerk Augst (Fluß-km 155,9) und Kraftwerk Birsfelden (Fluß-km 163,8) für einen Abfluß von 712 m^3/s am Pegel Rheinfelden die gemessenen und berechneten Konzentrationsverläufe miteinander verglichen.

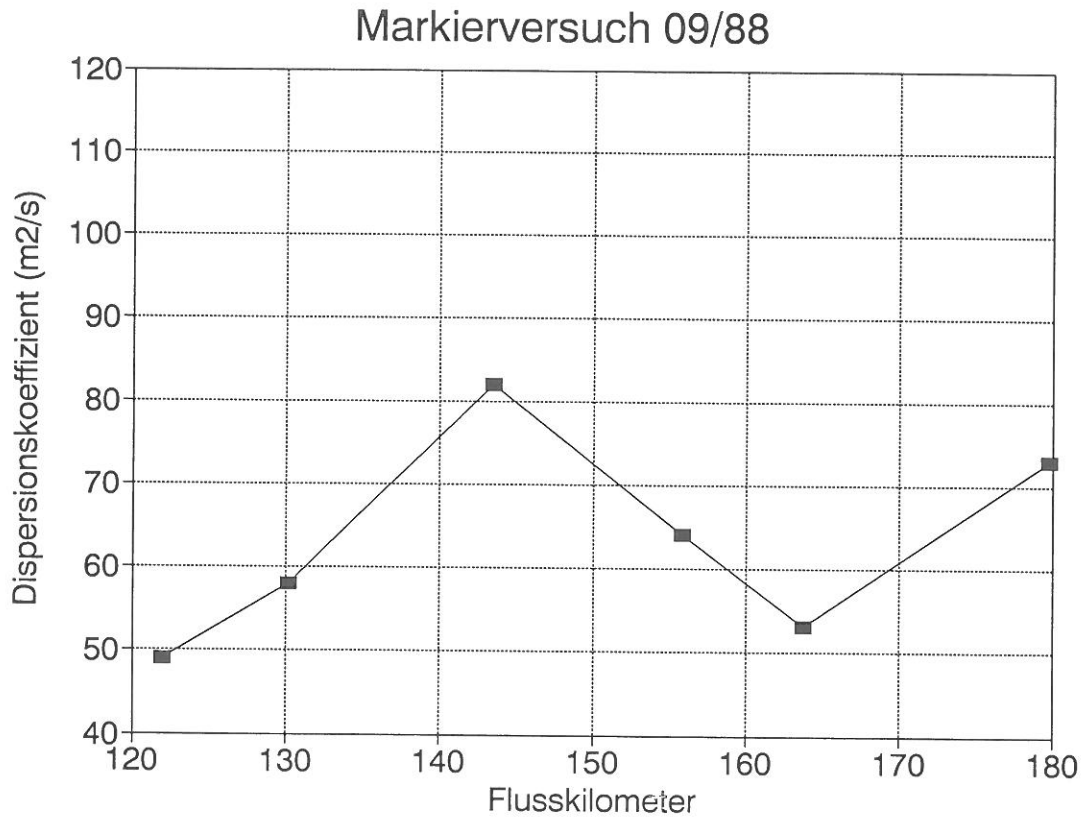


Abb. 5.5.2 Entwicklung des Dispersionskoeffizienten zwischen Albruck und Basel bei $Q_{\text{Rheinfelden}} = 712 \text{ m}^3/\text{s}$

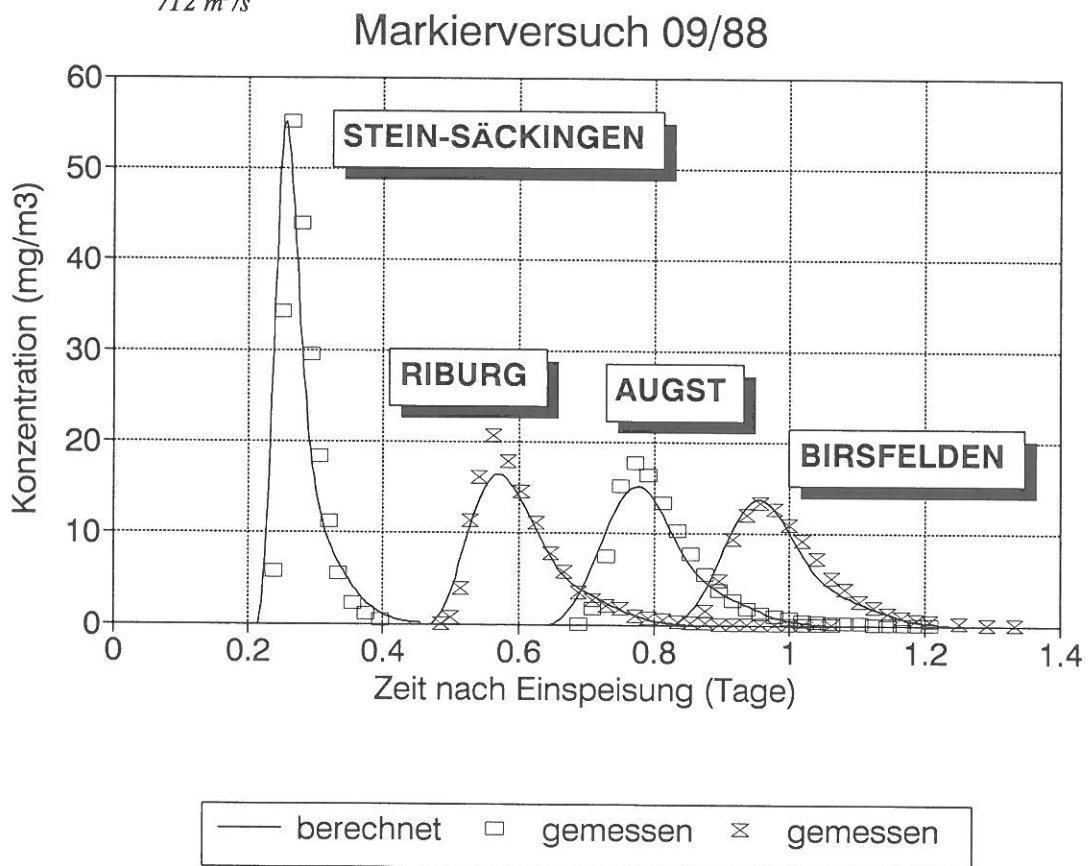


Abb. 5.5.3 Vergleich berechneter und gemessener Konzentrationsverläufe

5.5.2 Verifikation der Ober-, Mittel- und Niederrheinstrücke

Der Verifikation des Rheinalarmmodells stromabwärts von Basel standen die Daten von fünf Markierversuchen zur Verfügung:

- November 1988 von Basel bis Straßburg;
- Mai 1990 von Basel bis in die Niederlande;
- September 1990 von Village-Neuf bis in die Niederlande;
- Juni 1991 von Village-Neuf bis in die Niederlande;
- Juli 1991 von Village-Neuf bis nach Straßburg.

Aufgrund der detaillierteren Datenlage und der Tatsache, daß bei den Versuchen vom September 1990 und Juni 1991 die Markierstoffeinleitung in die Mitte des Rheinseitenkanals und nicht wie bei den Versuchen 11/88, 05/90 und 07/91 vom Ufer aus vorgenommen wurde, galt ihnen das größte Augenmerk bei dieser Verifikation. Die Einspeisung im Stromstrich ist wegen der schnelleren Querdurchmischung Voraussetzung, um schon nach relativ kurzen Distanzen nach der Einspeisung realistische Vorhersageergebnisse mit dem eindimensionalen Alarmmodell zu erzielen.

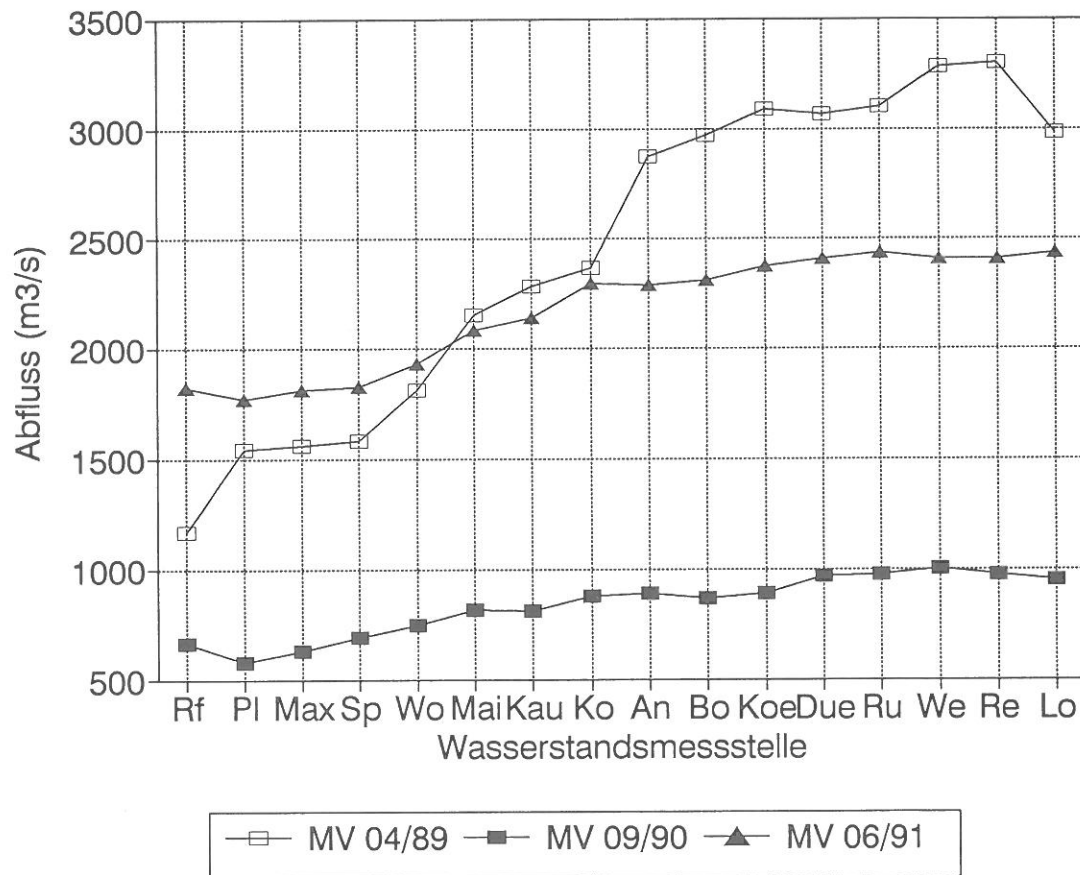


Abb. 5.5.4 Abflußverhältnisse entlang des Rheins während der Markierversuche 04/89, 09/90 und 06/91

In Abbildung 5.5.4 werden die Abflußverhältnisse entlang des Rheins während dieser zwei Versuche (09/90 und 06/91) mit denen des zur Kalibrierung herangezogenen Markierversuches 04/89 verglichen. Aus dem Vergleich mit den Hoch-, Mittel- und Niedrigwasserverhältnissen am Rhein (Abb. 5.5.5) ist zu schließen, daß der Kalibrierungsversuch 04/89 auf der Oberrheinstrücke bei einer Mittelwasserführung stattfand und auf der Mittel- und Niederrheinstrücke bei erhöhtem Mittelwasser. Bei dem Markierversuch 06/91 sind die Abflußverhältnisse auf der Ober- und Mittelrheinstrücke als ein erhöhtes Mittelwasser zu betrachten. Die Wasserführung beim Versuch 09/90 ist mit Niedrigwasserbedingungen vergleichbar.

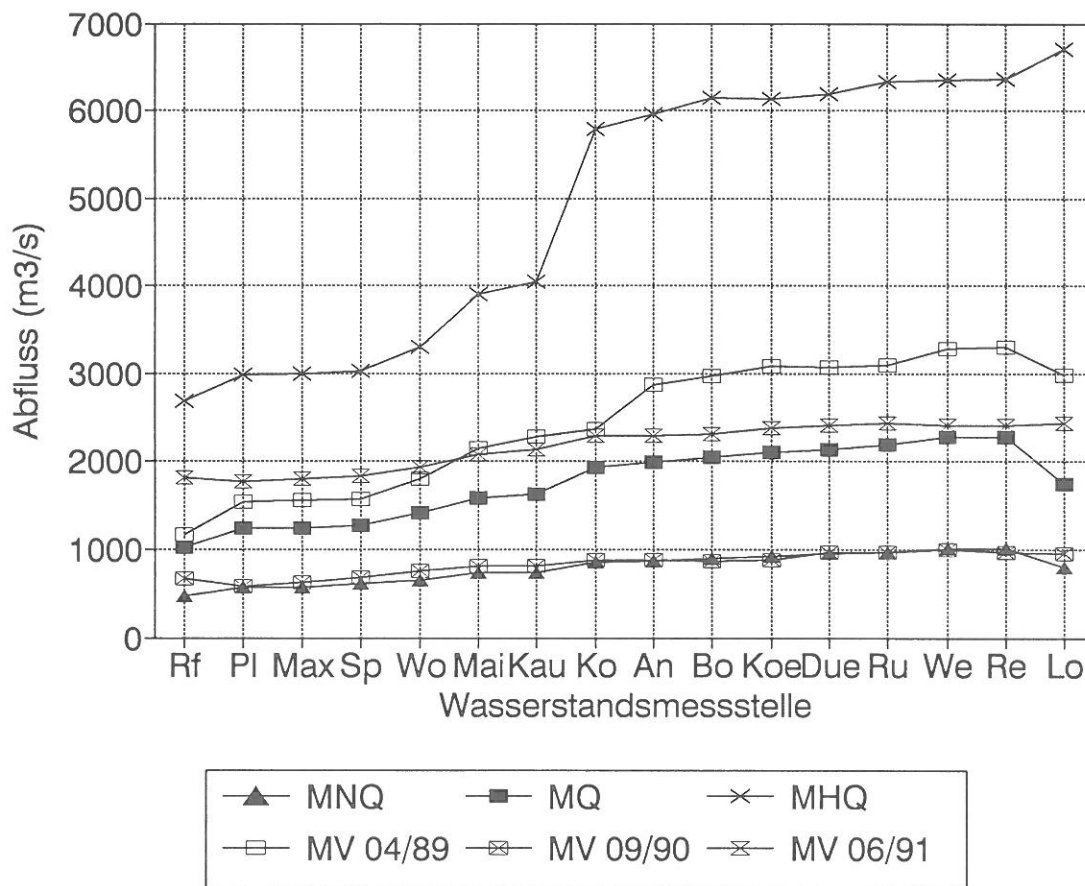


Abb. 5.5.5 Abflußverhältnisse entlang des Rheins bei Hoch-, Mittel- und Niedrigwasser im Vergleich zu den Verhältnissen während der Markierversuche 04/89, 09/90 und 06/91

Primäres Beurteilungskriterium bei der Verifikation des Rheinalarmmodelles war der Parameter der Stofftransportzeit (Stillwasserzonen-Parameter β), bzw. die Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Transportzeiten T_d .

In Abb. 5.5.6 werden für die Markierversuche 09/90 und 06/91 die relativen Transportzeitabweichungen nach Gleichung 5.3.3 graphisch dargestellt. Diese Verifikationsergebnisse zeigen eine Übereinstimmung der Vorhersage bezüglich der Eintreffzeit des Tracermaximums von durchschnittlich +5 % bei dem Versuch 09/90 und -5 % bei dem Versuch 06/91. Die durchgehende positive Abweichung bei dem Markierversuch 09/90 bedeutet, daß die durch das Alarmmodell berechneten Transportzeiten systematisch kürzer sind als die gemessenen Transportzeiten, während die negativen Werte beim Versuch 06/91 auf eine längere berechnete Transportzeit weisen.

Bei beiden Versuchen werden zwischen Flußkilometer 400 und 600 Abweichungen größer als 5% ermittelt. Die Transportabweichungen vom Versuch 09/90 bei den Flußkilometern 426,2 (Ludwigshafen) und 443,4 (Worms), direkt stromauf- und stromabwärts der Einmündung des Neckars (Fluß-km 428,5), könnten durch den Zufluß dieses Nebenflusses und die damit zusammenhängenden Strömungen und lokalen unvollständigen Querdurchmischungen des Tracers verursacht worden sein. Die Zunahme der Abweichung bei dem Versuch 06/91 bei Flußkilometer 498,5 (Mainz), direkt stromabwärts der Einmündung des Mains (Fluß-km 496,8), könnte ebenfalls in der Zuströmung des Nebenflusses ihre Ursache haben.

In Abbildung 5.5.7 werden für die Beobachtungspunkte Maximiliansau (Fluß-km 362,0), Mainz (Fluß-km 498,5), Bad Honnef (Fluß-km 640,0) und Lobith (Fluß-km 863,3) die berechneten und gemessenen Konzentrationskurven des Markierversuches 09/09 miteinander verglichen. In Abbildung 5.5.8 wird dieser Vergleich für die Beobachtungspunkte Karlsruhe (Fluß-km 359,2), Mainz (Fluß-km 498,5), Bad Honnef (Fluß-km 640,0) und Lobith (Fluß-km 863,3) des Markierversuches 06/91 angestellt.

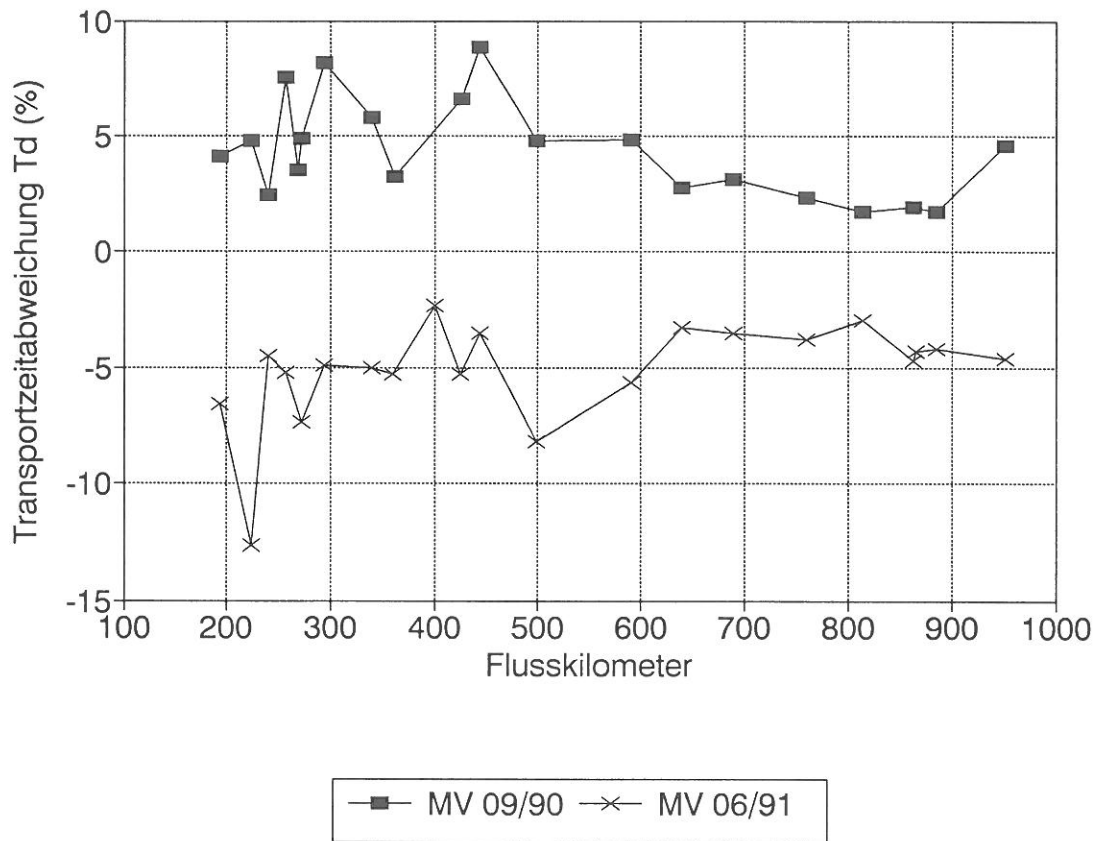


Abb. 5.5.6 Prozentuale Abweichung zwischen gemessener und berechneter Stofftransportzeit T_d nach Gl. (5.3.3) für die Markerversuche 09/90 und 06/91

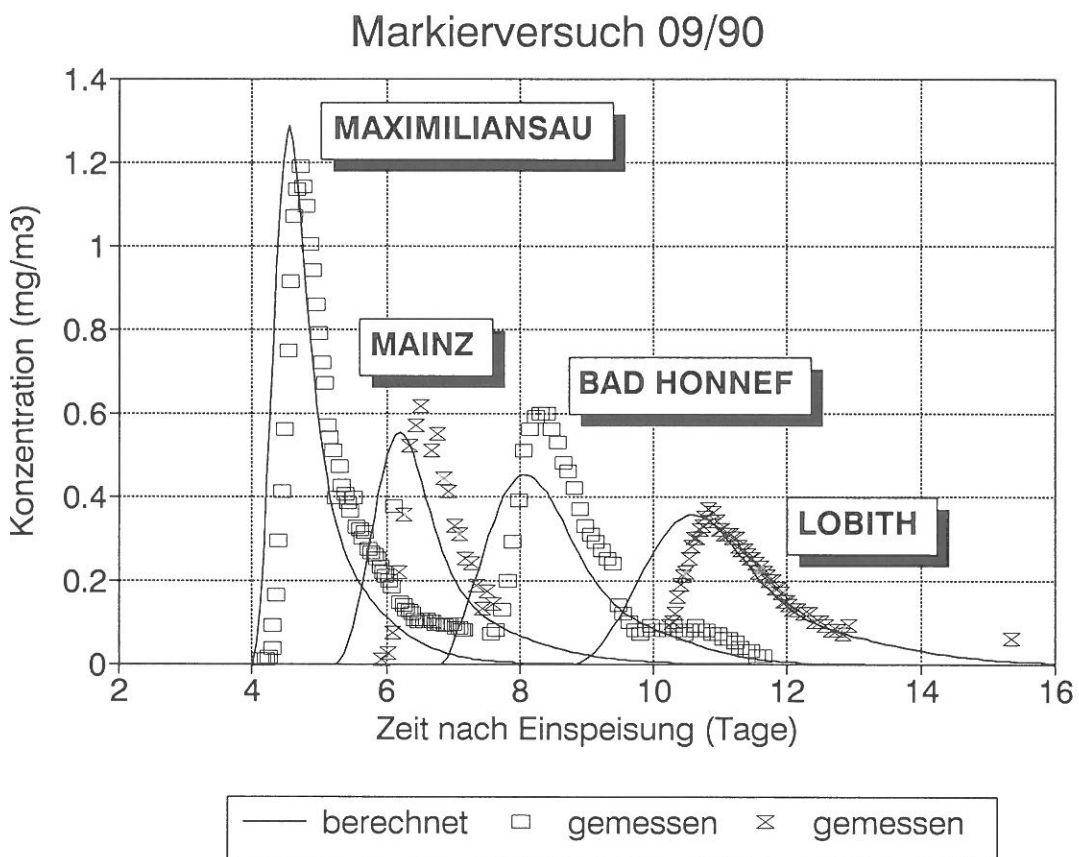


Abb. 5.5.7 Vergleich berechneter und gemessener Konzentrationsverläufe

Markierversuch 06/91

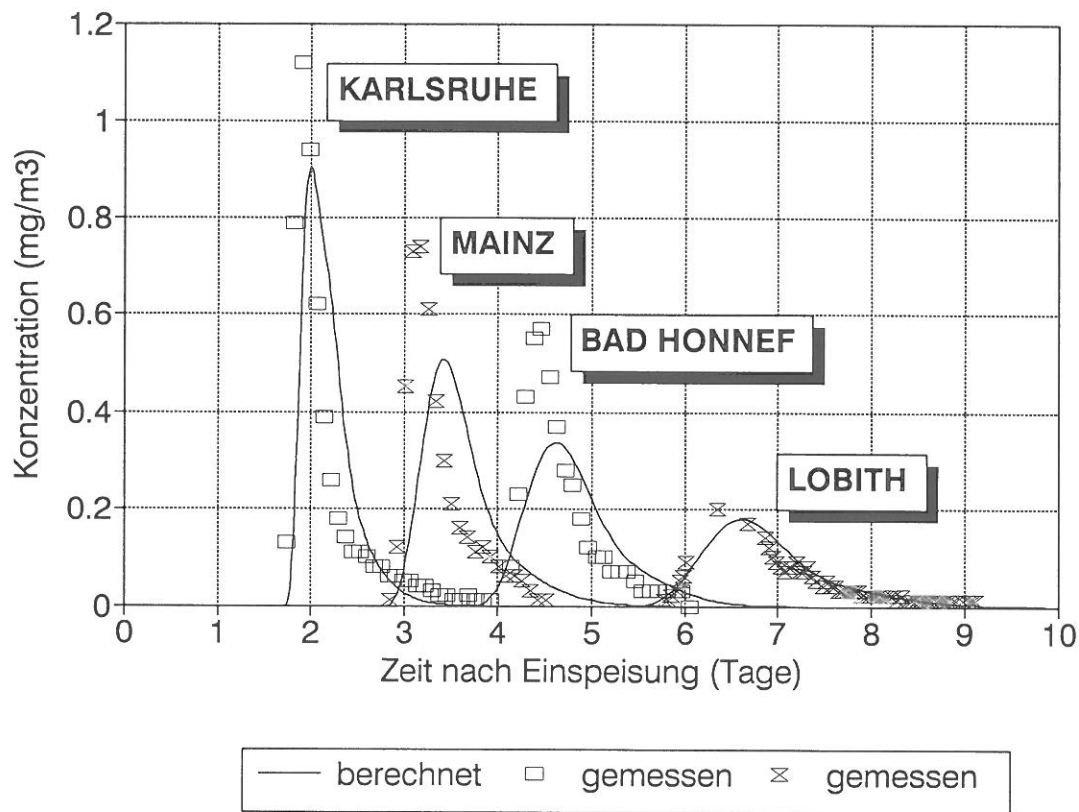


Abb. 5.5.8 Vergleich berechneter und gemessener Konzentrationsverläufe

Diese Vergleiche gemessener und berechneter Konzentrationsverläufe belegen, daß die gemessenen Kurvenverläufe auch ihrer Form nach relativ gut reproduziert werden. Beide Vergleiche zeigen jedoch, daß bei den Beobachtungspunkten Mainz und Bad Honnef die gemessenen Verläufe etwas kompakter sind als die berechneten. Dies könnte darauf hinweisen, daß die Dispersionskoeffizienten im Modell etwas zu groß sind.

Die Meßwerte der Beobachtungspunkte von Karlsruhe bis Bimmen (Fluß-km 362,0 - 865,02) des zur Kalibrierung herangezogenen Markierversuches 04/89 wurden bezüglich ihrer Grundlast nicht korrigiert (siehe Absatz 5.4.1). Inwiefern dies bei der Kalibrierung zu erhöhten Werten für den Dispersionsfaktor α führte, sollte in einer weiteren Überprüfung der Kalibrierung geklärt werden.

Zum Schluß gibt Abb. 5.5.9 die berechneten Dispersionskoeffizienten ab Einspeisepunkt für die jeweiligen Beobachtungspunkte des Markierversuches 09/90 und 06/91.

Im Vergleich zu den Dispersionskoeffizienten, ermittelt bei der Kalibrierung anhand des Markierversuches 04/89, zeigen sich kaum Unterschiede in der Größenordnung, während die Entwicklung des Koeffizienten identisch verläuft. Dies deutet darauf hin, daß auf Grund der linearen Beziehung zwischen dem Dispersionskoeffizienten D_s und der Fließgeschwindigkeit u_s nach Gleichung 5.2.13 mit Gleichung 5.2.3, die Fließgeschwindigkeit sich nicht im Maße des Abflusses ändert.

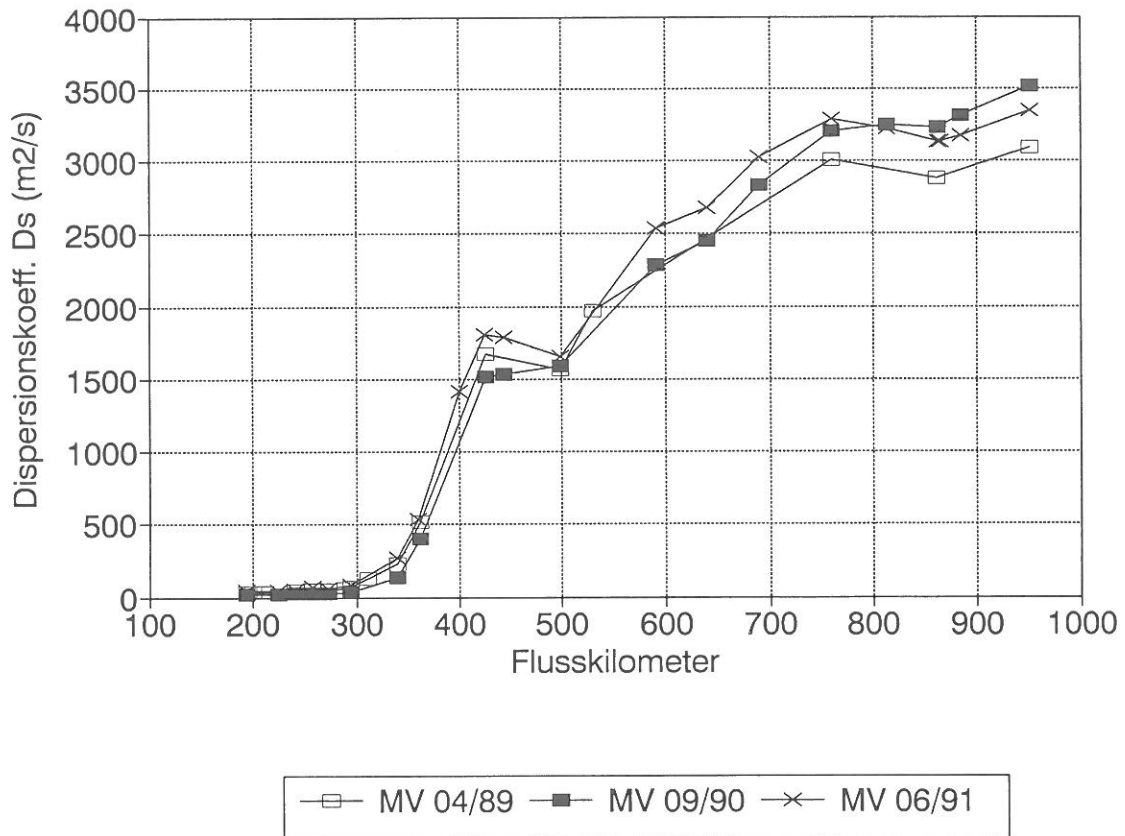


Abb. 5.5.9 Entwicklung des Dispersionskoeffizienten zwischen Basel und den Niederlanden bei den Markierversuchen 09/90 und 06/91, im Vergleich zum Markierversuch 04/89

Abbildung 5.5.10 stellt graphisch die Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Stofftransportzeiten der Markierversuche vom Mai 1990 und Juli 1991 dar. Es zeigte sich, daß der Tracer infolge der Ufereinleitung bis etwa 50 Kilometer nach der Einspeisung bei Flusskilometer 169 im Rheinseitenkanal noch nicht vollständig über den Querschnitt durchmischt war. Dies bedeutet, daß die erzielten Ergebnisse für die Untersuchungsstrecke bis Ottmarsheim (Fluß-km 194,4) nur eingeschränkt verwertbar sind. So betragen bei dem Versuch 05/90 die Stofftransportzeitabweichungen 10 Kilometer nach der Einspeisung etwa 25 % und reduzieren sich nach einer Lauflänge von etwa 30 Kilometern auf eine Größenordnung von ca. 10 %. Für die Strecke von Gerstheim (Fluß-km 268,5) bis Bimmen (Fluß-km 865,0) belaufen sich die Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Stofftransportzeiten auf durchschnittlich weniger als drei Prozent.

Bei dem Markierversuch 07/91 reduzieren sich die Abweichungen nach einer Lauflänge von etwa 30 Kilometern auf eine Größenordnung von ca. 5 %, während für die Strecke von Worms (Fluß-km 443,5) bis Bimmen (Fluß-km 865,0) die Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Stofftransportzeiten sich auf durchschnittlich ca. -5 %, wie beim Markierversuch 06/91, belaufen.

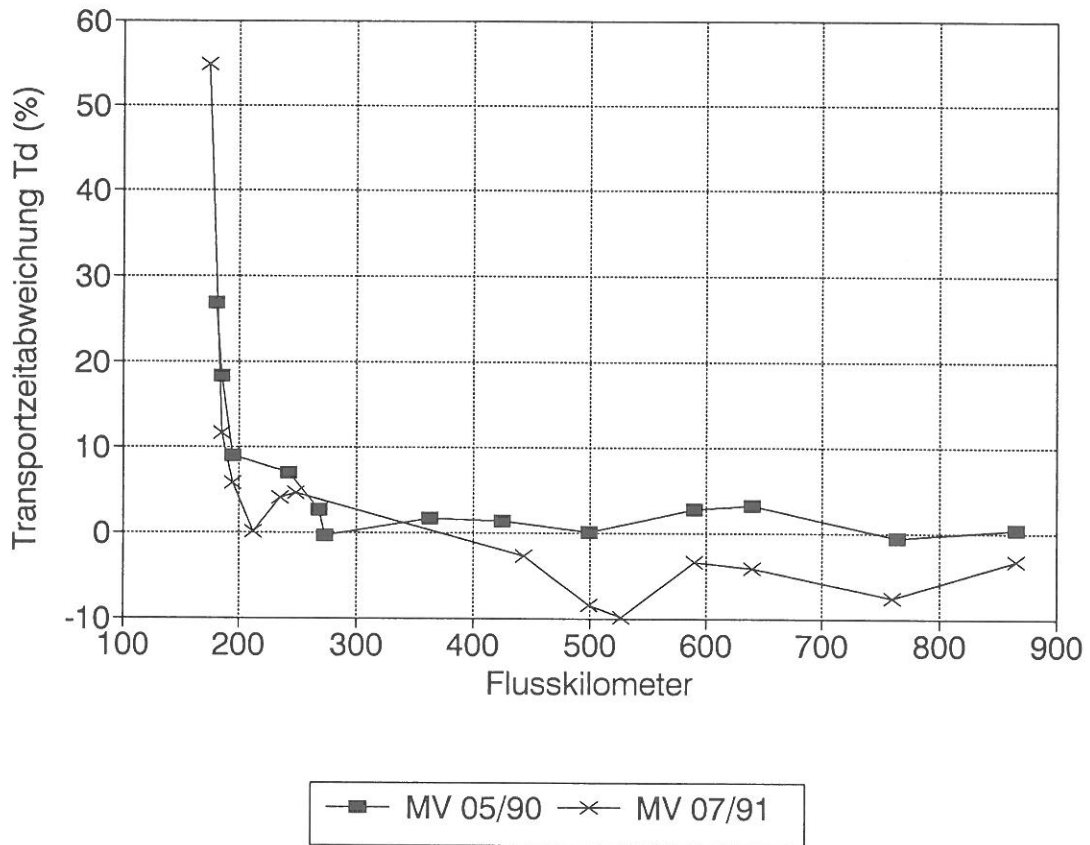


Abb. 5.5.10 Prozentuale Abweichungen zwischen gemessener und berechneter Stofftransportzeit T_d nach Gl. (5.3.3) für die Markierversuche 05/90 und 07/91

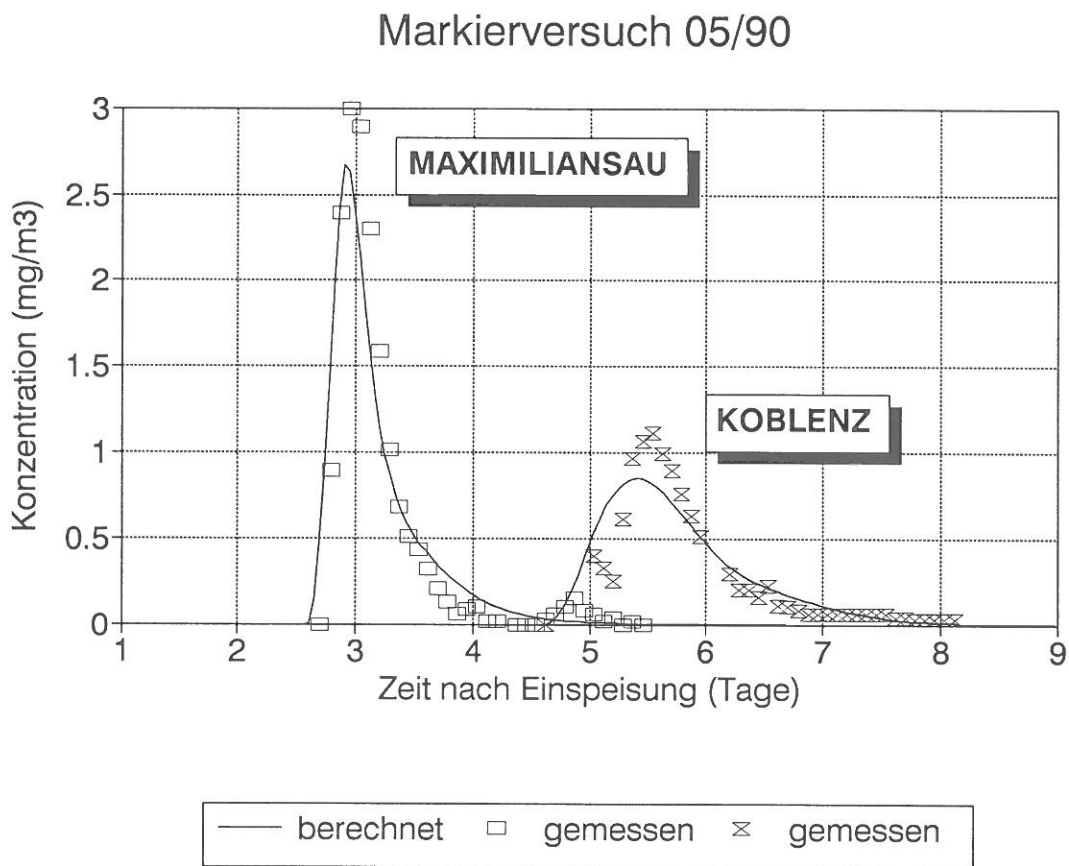


Abb. 5.5.11 Vergleich berechneter und gemessener Konzentrationsverläufe

Markierversuch 07/91

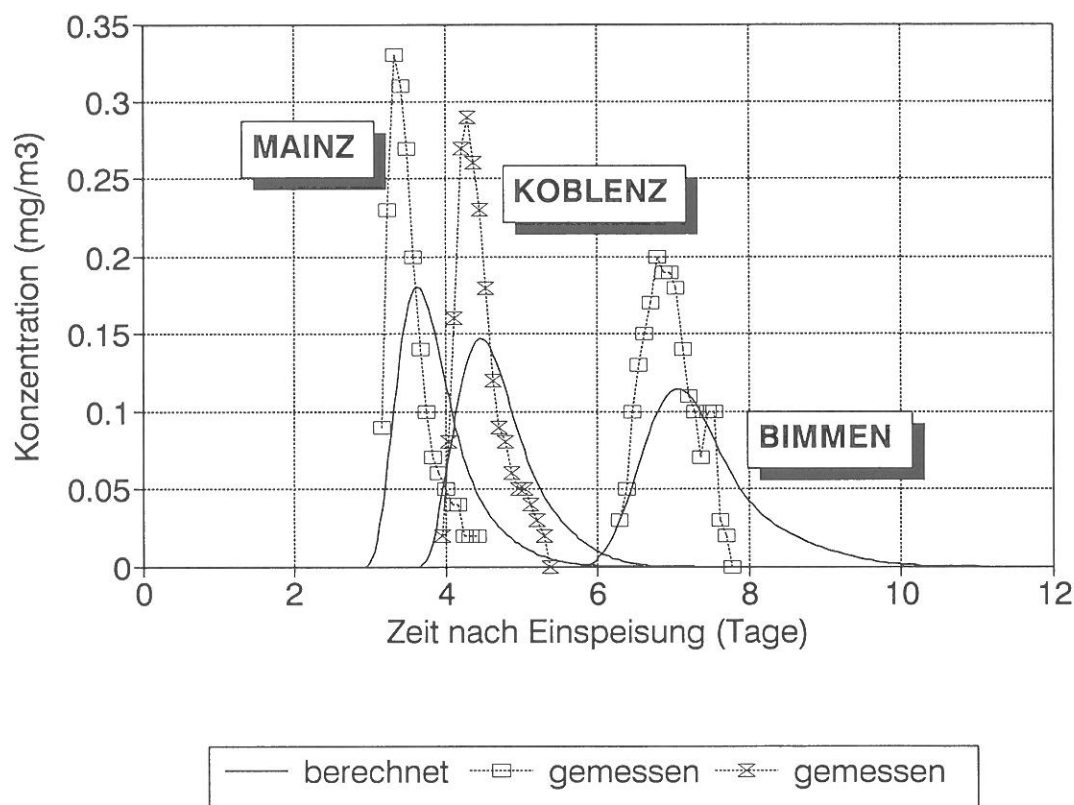


Abb. 5.5.12 Vergleich berechneter und gemessener Konzentrationsverläufe

In den Abbildungen 5.5.11 und 5.5.12 werden für einige ausgewählte Beobachtungspunkte der Versuche 05/90 bzw. 07/91 die gemessenen und berechneten Konzentrationsverläufe dargestellt.

Da es bei dem Versuch 05/90 nur wenige vollständig gemessene Tracerdurchgangskurven gab, sind nur die Beobachtungspunkte Maximiliansau (Fluß-km 362,0) und Koblenz (Fluß-km 590,35) wiedergegeben. Die zwei Vergleiche belegen, daß die gemessenen Kurvenverläufe, auch ihrer Form nach, relativ gut reproduziert werden.

Für den Markierversuch 07/91 wurden die Beobachtungspunkte Mainz (Fluß-km 498,5), Koblenz (Fluß-km 590,35) und Bimmen (Fluß-km 865,02) gewählt. Hier zeigt sich, wie bei den Versuchen 09/90 und 06/91, daß die gemessenen Konzentrationsverläufe kompakter als die berechneten sind.

Aus den Verifikationsergebnissen anhand der Daten des Markierversuches vom November 1988 geht hervor, daß infolge der Uferreinleitung in Zusammenhang mit der Kürze der Versuchsstrecke (Hünigen, Fluß-km 169,1 - Gerstheim, Fluß-km 273,3) dieser Versuch für eine Verifikation des eindimensionalen Rheinalarmmodells ungeeignet ist.

5.6 Schlußfolgerungen

Die durch die Kalibrierung des Rheinalarmmodells erhaltenen Werte des Stillwasserzonen-Parameters β liegen in der Größenordnung von 0 bis 0,1. In Strecken mit Bühnenfeldern, wie z.B. des Lek, können diese Werte bis auf 0,3 ansteigen. Auf der Hochrheinstrecke sind infolge der Kraftwerke, wodurch lokal der Markierstoff sich hauptsächlich in der Mitte des Stromstriches befand und deshalb mit einer größeren als der mittleren Fließgeschwindigkeit transport wurde, auch negative β -Werte (durchschnittlich bis -0,10) ermittelt worden.

Direkt stromabwärts der Nebenflüsse Aare, Neckar, Main und Mosel, wo sich keine Bühnenfelder befinden, sind β -Werte von 0,11 bis 0,34 ermittelt worden. Der hier auftretenden Verzögerung im Stofftransport könnte eine unvollständige Querdurchmischung in Zusammenhang mit dem Fließgeschwindigkeitsprofil zugrunde liegen. Eine Detailanalyse des Mischungs- und Strömungsvorganges könnte dies klären.

Die Werte der Proportionalitätskonstanten α des Dispersionskoeffizienten liegen für freifließende Rheinstrecken in der Größenordnung von 0,01. Für die niederländischen Rheinzweige wurden Werte des Parameters α in der Größenordnung von 0,02 bestimmt. Damit sind sie mit den von Fischer et al. [1979] erhobenen Ergebnissen vergleichbar. Für Kanalstrecken, bzw. kanalähnliche Flußabschnitte konnten α -Werte in der Größenordnung von 0,002 ermittelt werden, die damit um den Faktor zehn kleiner sind als die für die freifließenden Strecken berechneten.

Mit den Daten der zur Kalibrierung der herangezogenen Tracerexperimente können die in diesen Versuchen gemessenen Stofftransportzeiten mit einer Abweichung von durchschnittlich weniger als 2% reproduziert werden. So weichen die berechneten Eintreffzeiten in Kampen, Hagestein und Vuren, bei einer Stofftransportzeit ab Basel von etwa 200 Stunden, nur durchschnittlich vier Stunden von den gemessenen Werten ab. Die Eintreffzeit der Front des Markierstoffes wird mit annähernd gleicher Genauigkeit reproduziert.

Dadurch, daß der Abbau des Tracers und Verluste durch Infiltration ins Grundwasser oder durch Sorption nicht weiter quantifizierbar sind, läßt sich die Genauigkeit für die Reproduktion der jeweils gemessenen Maximalkonzentration nicht angeben. Gleiches gilt auch für ein Genauigkeitsmaß der ermittelten Dispersionskoeffizienten.

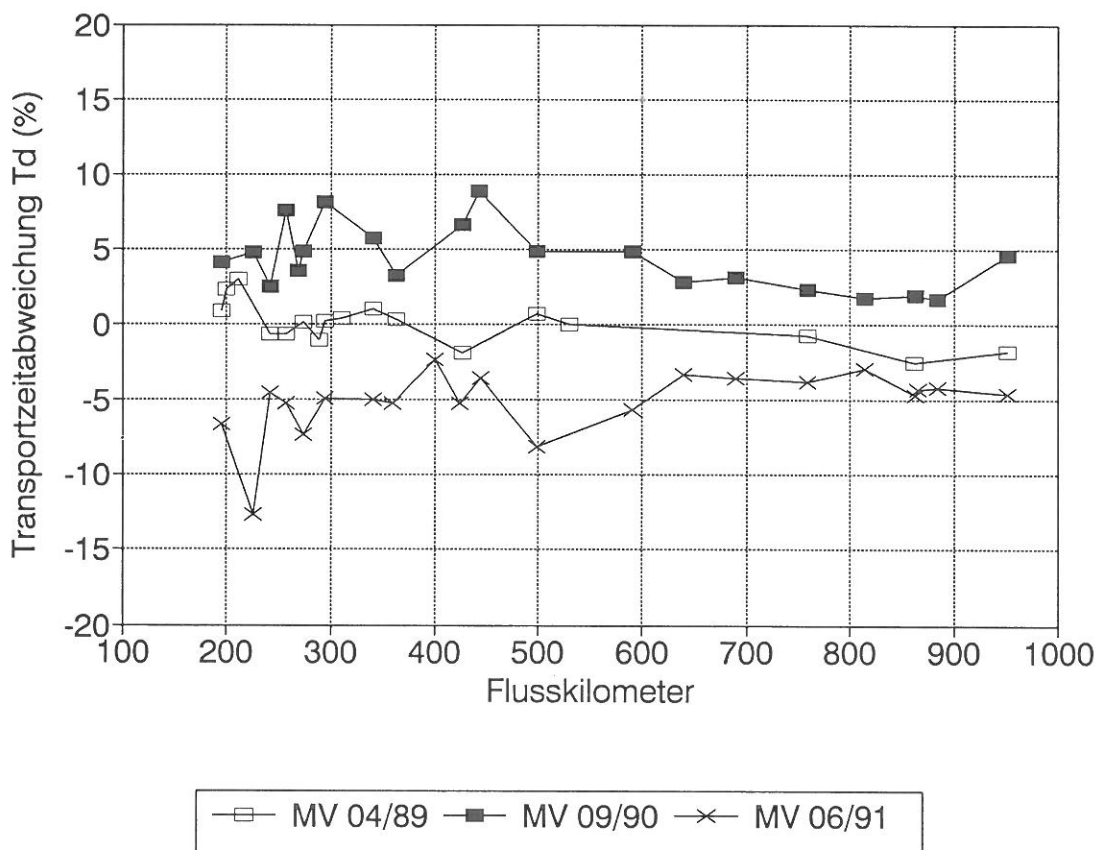


Abb. 5.6.1 Prozentuale Abweichung zwischen gemessener und berechneter Stofftransportzeit T_d nach Gl. (5.3.3) für die Markierversuche 04/89 (Kalibrierung), 09/90 und 06/91

Die für die Verifikation der *Ober-, Mittel- und Niederrheinstrecke* vorrangig betrachteten Markierversuche vom September 1990 und Juni 1991 mit ihrer Untersuchungsstrecke von Village-Neuf bis in die Niederlande fanden bei Niedrigwasserverhältnissen bzw. zum Teil erhöhten Mittelwasserverhältnissen des Rheins statt. Die Abweichung der Vorhersage des Rheinalarmmodells bezüglich der Eintreffzeit des Tracermaximums, aber auch des gesamten Kurvenverlaufs, liegt ab etwa 50 Kilometer nach der Einspeisung bei durchschnittlich fünf Prozent (Abb. 5.6.1). Beim Markierversuch vom September 1990 sind die Abweichungen T_d jedoch durchgehend positiv, d.h. die durch das Alarmmodell berechneten Stofftransportzeiten sind systematisch kürzer als die gemessenen Transportzeiten (siehe auch Gl. 5.3.3), während beim Markierversuch vom Juni 1991 die Abweichungen durchgehend negativ sind.

Die oben erwähnten Unterschiede zwischen gemessenen und berechneten Stofftransportzeiten werden u.a. durch die Stillwasserzonen verursacht. Der Einfluß von Stillwasserzonen auf den Stofftransport macht sich durch Vergrößerung der Transportzeiten bemerkbar, daß heißt, temporäre Speicherung des Stoffes in den Stillwasserzonen verzögert den Prozeß des Stofftransportes. Da dem Einfluß von Stillwasserzonen im Modell durch den Parameter β Rechnung getragen wird, bedeutet die Eingabe eines größeren β -Wertes die Erhöhung der berechneten Transportzeit.

Der für die Verifikation der *Hochrheinstrecke* herangezogene Markierversuch vom September 1988 mit seiner Untersuchungsstrecke von Albruck bis Basel fand bei verhältnismäßig kleinem Abfluß statt (712 m³/s bei Rheinfeldern). Die Abweichung der Vorhersage des Rheinalarmmodells bezüglich der Eintreffzeit des Tracermaximums liegt in diesem Falle, ab etwa 20 Kilometer nach der Einspeisung bei Albruck, bei 1 bis 2% (Abb. 5.6.2).

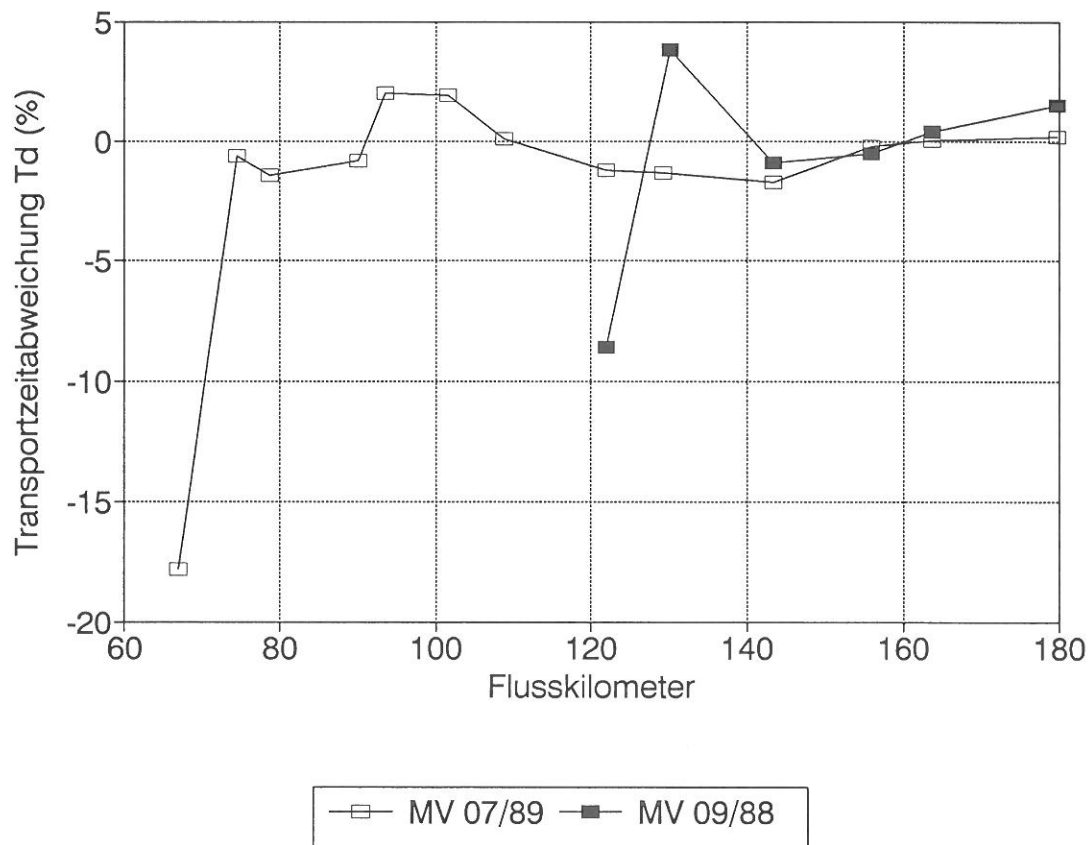


Abb. 5.6.2 Prozentuale Abweichungen zwischen gemessener und berechneter Stofftransportzeit T_d nach Gl. (5.3.3) für die Markierversuche 09/88 und 07/89 (Kalibrierung)

Da die Stofftransportzeitabweichungen bei den Abflußsituationen der für die Verifikation herangezogenen Markierversuche durchschnittlich weniger als +/- fünf Prozent betragen, ergibt sich zur Zeit keine Notwendigkeit für eine Neukalibrierung und Anpassung des Parameters β .

Die Verifikation zeigte weiter, daß die gemessenen Kurvenverläufe auch der Form nach relativ gut reproduziert werden können. Dies läßt darauf schliessen, daß die zur Zeit in das Rheinalarmmodell eingegebenen Werte der Proportionalitätskonstanten α des Dispersionskoeffizienten, unter Vernachlässigung des Abbaus, gegenwärtig ebenfalls keiner Nachstellung bedürfen.

Für Markierversuche bei denen schon in relativ kurzen Entfernungen von der Einspeisestelle Konzentrationsmessungen vorgesehen sind, sollten die Einleitungen der Tracersubstanz in Fluß- bzw. Kanalmitte oder über den gesamten Querschnitt vorgenommen werden. Dies belegen besonders die Stofftransportzeitabweichungen der Markierversuche vom Mai 1990 und Juli 1991, die auf den ersten siebenzig Kilometern nach der Einspeisung zwischen 5 und 55 % liegen und sich auf der folgenden Strecke bis zur niederländischen Grenze auf Werte zwischen -5 und +5 % einpendeln.

5.7 Diskussion

Bei der Analyse der ermittelten Werte des Stillwasserzonen-Parameters β zeigte sich, daß für eine gute Abschätzung dieses Parameters die detaillierte Kenntnis über die Abflüsse in den betreffenden Abschnitten von vorrangiger Bedeutung ist. Besonders für die staugeregelte Oberrheinstrecke zwischen Basel und Plittersdorf ist dies nicht in hinreichendem Maß gegeben. Dabei unterliegt das Alarmmodell für den Rhein der Beschränkung, daß die Abflüsse über diese Strecke auf den Abfluß am Pegel Rheinfeldern bezogen sind. Über diese definierte Beziehung liegen auch die Fließzeiten fest. Es wäre eine wesentliche Verbesserung für das Alarmmodell, wenn die Abflüsse auf dieser Teilstrecke (z.B. die des Pegels Kehl-Kronenhof) direkt eingegeben werden könnten.

Die bei dem Markierversuch 09/90 ermittelten Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Stofftransportzeiten belegen, daß der Parameter β bei Niedrigwasser höher anzusetzen ist als bei mittlerer Wasserführung des Rheins, für welche das Alarmmodell kalibriert wurde. Die bei dem Markierversuch 06/91 ermittelten Abweichungen belegen andererseits, daß der Parameter β bei erhöhter Wasserführung auf der Oberrheinstrecke und auf der ganzen Strecke von Basel bis in die Niederlande niedriger anzusetzen ist. Dies gilt, obwohl die Wasserführung auf der Mittel- und Niederrheinstrecke geringer als bei dem zur Kalibrierung herangezogenen Markierversuch war. Inwiefern daraus zu schließen ist, daß die Stofftransportzeitabweichungen auf der Oberrheinstrecke auch die ermittelten Abweichungen stromabwärts von Plittersdorf beeinflussen, könnte in einer Detailanalyse untersucht werden.

Auf der Strecke des Rheinseitenkanals wird bei niedrigeren Abflüssen die Fließzeit nebst den Stillwasserzonen vom Schwellbetrieb beeinflusst. Beim Niedrigwasser wird durch den Schwellbetrieb der Transport des Markierstoffes mehr verzögert als beim Mittelwasser, was bei Niedrigwasser einem höheren β -Wert entspricht. Ob ausschließlich der Schwellbetrieb Ursache der Abweichungen auf der Oberrheinstrecke bis Plittersdorf ist, kann nur durch Analyse detaillierter Information über die Abflußverhältnisse während der Tracerversuche geklärt werden.

Für die niederländischen Rheinarme wird von einer festen Abflußverteilung über die Waal, die IJssel und den Lek, bezogen auf den Abfluß am Pegel Lobith, ausgegangen. Auch für diese Teilstrecke empfiehlt es sich, von Pegeln in den betreffenden Flußabschnitten auszugehen. Dabei sollten die Fließzeitabstände ebenfalls nicht mehr auf den Wasserstand am Pegel Lobith, sondern auf den Wasserstand der betreffenden Wasserstandsmeßstelle bezogen werden. Für die Waal könnte die Meßstelle Tiel gewählt werden, für die IJssel die Meßstelle Deventer und/oder Kampen und für den Lek die Meßstelle Hagestein.

Bei der Anwendung des Modells ist das Folgende zu beachten:

1. Bei der Einleitung eines Stoffes in einen Fluß wird der Konzentrationsverlauf in relativ kurzer Entfernung von der Einleitungsstelle von der Einleitungsart und der Lage der Einleitungsstelle innerhalb des Flußquerschnittes (schnell fließender Teil des abflußwirksamen Querschnittes oder Stillwasserteil) mitbestimmt. Diese Aspekte, sowie natürliche und künstliche örtliche Unregelmäßigkeiten verursachen zusätzliche Auswirkungen auf den Konzentrationsverlauf. Diese werden meist als sogenannte »near-field«-Effekte von den »far-field«-Effekten unterschieden. Von »far-field«-Effekten spricht man, wenn sich der Dispersionsprozeß zumindest annähernd gemäß des

- Dispersionsmodelles nach Taylor (Absatz 5.2) entwickelt hat. Im Alarmmodell wird angenommen, daß diese »far-field«-Bedingung sofort nach der Einleitung gilt. Die Ergebnisse des Modells sind daher für die Strecke direkt stromabwärts der Einspeisestelle nur beschränkt verwendbar.
2. Bei instationären Abflußverhältnissen ist die Konzentrationsvorhersage des Alarmmodells nur für kurze Zeiträume gültig.
 3. Bei nicht konservativen Stoffen ist die Vorhersagegenauigkeit der Maximalkonzentrationen sehr eingeschränkt.

5.8 Abkürzungsverzeichnis

Wasserstandsmeßstelle

Rf	:	Rheinfelden
Pl	:	Plittersdorf
Max	:	Maxau
Sp	:	Speyer
Wo	:	Worms
Mai	:	Mainz
Kau	:	Kaub
Ko	:	Koblenz
An	:	Andernach
Bo	:	Bonn
Koe	:	Köln
Due	:	Düsseldorf
Ru	:	Ruhrort
We	:	Wesel
Re	:	Rees
Lo	:	Lobith

Abflußverhältnisse

MNQ	:	Mittlerer Niedrigwasserabfluß
MQ	:	Mittelwasserabfluß
MHQ	:	Mittlerer Hochwasserabfluß

Markierversuche

MV 09/88	:	Markierversuch September 1988 (Albbruck - Basel)
MV 11/88	:	Markierversuch November 1988 (Basel - Straßburg)
MV 04/89	:	Markierversuch April 1989 (Village Neuf - Niederlande)
MV 07/89	:	Markierversuch Juli 1989 (Rheinau - Basel)
MV 05/90	:	Markierversuch Mai 1990 (Basel - Niederlande)
MV 09/90	:	Markierversuch September 1990 (Village Neuf - Niederlande)
MV 06/91	:	Markierversuch Juni 1991 (Village Neuf - Niederlande)
MV 07/91	:	Markierversuch Juli 1991 (Basel - Bimmen)

5.9 Literaturverzeichnis

- Adler, M. (1990): »Fließzeiten in der Mosel aus Wasserspiegellagenberechnungen«. BfG - 0532, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
- Bremicker, M. (1989): »Verfahren zur Analyse und Simulation der Stoffausbreitung in Fließgewässern«. Diplomarbeit am Institut für Physische Geographie, Lehrstuhl für Hydrologie, Universität Freiburg
- Craenenbroeck, W. van, J. Marivoet und P. Stas (1985): »Wasserverwaltung und Dispersion im Albertkanal und in den Kempischen Kanälen« (in niederländischer Sprache). Freie Universität von Brüssel, Dienst Hydrologie

- Chatwin, P.C. (1980): »Presentation of longitudinal dispersion data«. Proc. ASCE J. Hydr. Div 106 HY1 S. 71-83
- Fischer, H.B., E.J. List, R.C.Y. Koh, J. Imberger und N.H. Brooks (1979): »Mixing in inland and coastal waters«. Academic press, New York
- Gelhar, L.W. und M.A. Collins (1971): »General analysis of longitudinal dispersion in nonuniform flow«. Water Resources Research, Vol. 7, Nr. 6
- Griffioen, P.S. (1989): »Alarmmodell für den Rhein / Modèle d'alerte pour le Rhin«. IKSR/KHR Expertengruppe, Bericht Nr. II-2 der KHR
- Leibundgut, Ch., J. Petermann, B. Schudel, M. Gossauer und D. Morgenthaler (1989): Markierversuch Rhein »Rheinau - Basel«. Universität Bern, Geographisches Institut, in Zusammenarbeit mit Naturaqua
- Mazijk, A. van, R.M. Noppeney, T. van Ellen und P. Verwoerd (1989): »Empfindlichkeitsanalyse des Alarmmodells für den Rhein« (niederländische Version), Mitteilung 27 der Fachgruppe Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung, Technische Universität Delft, Fakultät für Zivile Technik, Fachgruppe Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung und Rijkswaterstaat, Dienst für Binnengewässer/RIZA, Mai 1989
- Mazijk, A. van (1989): »Empfindlichkeitsanalyse des Alarmmodells für den Rhein«, Technische Universität Delft, Fakultät für Zivile Technik, Fachgruppe Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung und Rijkswaterstaat, Dienst für Binnengewässer/RIZA, Mai 1989
- Mazijk, A. van, P. Verwoerd und J. van Mierlo (1991): »Kalibrierung des Alarmmodells für den Rhein anhand des Markierversuches 04/89 Village Neuf - Niederlande«, TU Delft, Fakultät für Zivile Technik, Fachgruppe Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung und Rijkswaterstaat, Staatliches Amt für integrale Verwaltung der Binnengewässer und Abwasserreinigung RIZA, März 1991
- Mazijk, A. van und J. van Mierlo (1991): »Kalibrierung des Alarmmodells für den Rhein anhand des Markierversuches 09/88 Albruck - Basel«, Technische Universität Delft, Fakultät für Zivile Technik, Fachgruppe Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung und Rijkswaterstaat, Staatliches Amt für integrale Verwaltung der Binnengewässer und Abwasserreinigung RIZA, März 1991
- Mazijk, A. van und J. van Mierlo (1991): »Kalibrierung des Alarmmodells für den Rhein anhand des Markierversuches 07/89 Rheinau - Basel«, Technische Universität Delft, Fakultät für Zivile Technik, Fachgruppe Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung und Rijkswaterstaat, Staatliches Amt für integrale Verwaltung der Binnengewässer und Abwasserreinigung RIZA, April 1991
- Mazijk, A. van, J. van Mierlo und H. Wiesner (1991): »Verifikation des Alarmmodells für den Rhein Version 2.0«, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i.Br., Institut für Physische Geographie, Lehrstuhl für Hydrologie und Technische Universität Delft, Fakultät für Zivile Technik, Fachgruppe Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung, Juni 1991
- Mazijk, A. van, P. Verwoerd, J. van Mierlo, M. Bremicker und H. Wiesner (1991): »Rheinalarmmodell Version 2.0, Kalibrierung und Verifikation«. IKSR/KHR Expertengruppe, Bericht Nr. II-4 der KHR
- Mazijk, A. van (1992): »Neukalibrierung und Verifikation der Hochrheinstrecke im Rheinalarmmodell Version 2.1«, Technische Universität Delft, Fakultät für Zivile Technik, Fachgruppe Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung und Rijkswaterstaat, Staatliches Amt für integrale Verwaltung der Binnengewässer und Abwasserreinigung RIZA, Juni 1992
- Mazijk, A. van und J.M.C. van Mierlo (1992): »Überprüfung der Kalibrierung des Rheinalarmmodells Version 2.1 anhand des Markierversuches 04/89 Village Neuf - Niederlande«, Technische

Universität Delft, Fakultät für Zivile Technik, Fachgruppe Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung und Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., Institut für Physische Geographie, Lehrstuhl für Hydrologie, Dezember 1992

Mazijk, A. van, J.M.C. van Mierlo, H. Wiesner und Ch. Leibundgut (1992): »Verifikation des Rheinalarmmodells anhand der Markerversuche 06/91 und 07/91«, Technische Universität Delft, Fakultät für Zivile Technik, Fachgruppe Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung und Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., Institut für Physische Geographie, Lehrstuhl für Hydrologie, Dezember 1992

Nordin C.F. und B.M. Troutman (1980): »Longitudinal Dispersion in rivers: the persistence of skewness in observed data«. Wat. Resour. Res. Vol. 16, Nr.1, S. 123-128

Service de la Navigation de Strasbourg (1988): »Essai de tracage du 18 Novembre 1988«, Protokoll der Meßdaten, Straßburg

Service de la Navigation de Strasbourg (1990): »15 Mai 1990, Tracage sur le Rhin«, Rapport: Octobre 1990, Straßburg

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (1992): »Berechnung von Fließzeiten in der Aare«. Vorbericht mit Teilergebnissen, Im Auftrag der Landeshydrologie und -geologie, Bern, 15.3.1992

VERDANKUNGEN

Neben den leitenden Gremien der IKS_R und KHR sowie den Direktoren der beteiligten Institutionen gilt unser Dank den folgenden Damen und Herren, die in irgendeiner Form mitverantwortlich sind für die erfolgreiche Durchführung der Arbeiten:

Sekretariate

J. M. Goppel	IKSR
D. Hogervorst	IKSR
F.H.M. van de Ven	KHR
E. Sprokkereef	KHR

Schweiz

J. Bichsel	Landeshydrologie und -geologie, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern
R. Bigler	
A. Geissel	
A. Jakob	
B. Schädler	

A. Kühne	Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zürich
G. Schneider	

J. Petermann	Naturaqua, Bern
B. Schudel	

A. Gees	Gruppe für Hydrologie, Geographisches Institut der Uni Bern
M. Gossauer	
D. Morgenthaler	

Deutschland

M. Bremicker	Lehrstuhl für Hydrologie, Institut für Physische Geographie, Universität Freiburg i.Br.
Ch. Leibundgut	
J.M.C. van Mierlo	
U. Speidel	
H. Wiesner	

M. Adler	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
H. Engel	
H. Hanisch	
G. Steinebach	

Frankreich

P. Fournaise	Service de la navigation de Strasbourg
O. Havas	

Niederlande

G.J.A.A. Broer	Staatliches Amt für Integralverwaltung der Binnengewässer und für Abwasserreinigung, Rijkswaterstaat
P.S. Griffioen	

A. de Haas
H. Klavers

J. van Malde

Dienst für Tidegewässer, Rijkswaterstaat

A. van Mazijk

Technische Universiteit Delft, Fakultät für zivile Technik, Fachgruppe
Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung

KHR-VERÖFFENTLICHUNGEN

CHR/KHR (1978): Das Rheingebiet, Hydrologische Monographie. Staatsuitgeverij, Den Haag/
Le bassin du Rhin. Monographie Hydrologique. Staatsuitgeverij, La Haye. ISBN 9-1201-775-0

Berichte der KHR

Rapports de la CHR

- I-1 GREBNER, D. (1982): Objektive quantitative Niederschlagsvorhersagen im Rheingebiet. Stand 1982 (nicht mehr lieferbar)/
Prévisions objectives et quantitatives des précipitations dans le bassin du Rhin. Etat de la question en 1982 (édition épuisée)
- I-2 GERHARD, H., J.W. VAN DER MADE, J. REIFF, L.P.M. DE VREES (1983): Die Trocken- und Niedrigwasserperiode 1976. (2. Auflage 1985)/
La sécheresse et les basses eaux de 1976 (2ème édition, 1985). ISBN 90-7098-001-0
- I-3 HOFIUS, K. (1985): Hydrologische Untersuchungsgebiete im Rheingebiet/
Bassins de recherches hydrologiques dans le bassin du Rhin. ISBN 90-7098-002-9
- I-4 BUCK, W., R. KIPGEN, J.W. VAN DER MADE, F. DE MONTMOLLIN, H. ZETTL, J.F. ZUMSTEIN (1986): Berechnung von Hoch- und Niedrigwasserwahrscheinlichkeit im Rheingebiet/
Estimation des probabilités de crues et d'étiages dans le bassin du Rhin. ISBN 90-7098-003-7
- I-5 TEUBER, W., A.J. VERAART (1986): Abflußermittlung am Rhein im deutsch-niederländischen Grenzbereich/
La détermination des débits du Rhin dans la région frontalière germano-hollandaise. ISBN 90-7098-004-5
- I-6 TEUBER, W. (1987): Einfluß der Kalibrierung hydrometrischer Meßflügel auf die Unsicherheit der Abflußermittlung. Ergebnisse eines Ringversuchs/
Influence de l'étalonnage des moulinets hydrométriques sur l'incertitude des déterminations de débits. Résultats d'une étude comparative. ISBN 90-7098-005-3
- I-7 MENDEL, H.G. (1988): Beschreibung hydrologischer Vorhersagemodelle im Rheineinzugsgebiet/
Description de modèles de prévision hydrologiques dans le bassin du Rhin. ISBN 90-7098-006-1
- I-8 ENGEL, H., H. SCHREIBER, M. SPREAFICO, W. TEUBER, J.F. ZUMSTEIN (1990): Abflußermittlung im Rheingebiet im Bereich der Landesgrenzen/
Détermination des débits dans les régions frontalières du bassin du Rhin. ISBN 90-7098-001-x
- I-9 CHR/KHR (1990): Das Hochwasser 1988 im Rheingebiet/
La crue de 1988 dans le bassin du Rhin. ISBN 90-7098-011-8
- I-10 NIPPES, K.-R. (1991): Bibliographie des Rheingebietes/
Bibliographie du bassin du Rhin. ISBN 90-70980-11-8
- I-11 BUCK, W., K. FELKEL, H. GERHARD, H. KALWEIT, J. VAN MALDE, K.-R. NIPPES, B. PLOEGER, W. SCHMITZ (1993): Der Rhein unter der Einwirkung des Menschen - Ausbau, Schifffahrt, Wasserwirtschaft/
Le Rhin sous l'influence de l'homme - Aménagement, navigation, gestion des eaux. ISBN 90-70980-17-7
- I-12 ADLER, M.; A. JAKOB, H. HANISCH, CH. LEIBUNDGUT, A. VAN MAZUIK, M. SPREAFICO, H. WIESNER (1993): Alarmmodell Rhein. Ein Modell für die operationelle Vorhersage des Transportes von Schadstoffen im Rhein. ISBN 90-70980-18-5
- Katalog/Catalogue 1 SPROKKEREEF, E. (1989): Verzeichnis der für internationale Organisationen wichtigen Meßstellen im Rheingebiet/
Tableau de stations de mesure importantes pour les organismes internationaux dans le bassin du Rhin. ISBN 90-7098-008-8

Berichte unter der Schirmherrschaft der KHR

- II-1 MADE, J.W. VAN DER (1982): Quantitative Analyse der Abflüsse (nicht mehr lieferbar)/
Analyse quantitative des débits (édition épuisée)
- II-2 GRIFFIOEN, P.S. (1989): Alarmmodell für den Rhein/
Modèle d'alerte pour le Rhin. ISBN 90-7098-007-x
- II-3 SCHRÖDER, U. (1990): Die Hochwasser an Rhein und Mosel im April und Mai 1983/
Les crues sur les bassins du Rhin et de la Moselle en avril et mai 1983. ISBN 90-7098-009-6

- II-4 MAZUK, A. VAN, P. VERWOERDT, J. VAN MIERLO, M. BREMICKER, H. WIESNER (1991): Rhein-
alarmmodell Version 2.0 - Kalibrierung und Verifikation/
Modèle d'alerte pour le Rhin version 2.0 - Calibration et vérification. ISBN 90-7098-012-6
- II-5 MADE, J.W. VANDER (1991): Kosten-Nutzen-Analyse für den Entwurf hydrometrischer Meßnetze/
Analyse des coûts et des bénéfices pour le projet d'un réseau hydrométrique. ISBN 90-70980-14-2
- II-6 CHR/KHR (1992): Contribution to the European workshop Ecological Rehabilitation of Floodplains,
Arnhem, The Netherlands, 22-24 September 1992. ISBN 90-70980-15-0
- II-7 NEMEC, J. (1993): Comparison and selection of existing hydrological models for the simulation
of the dynamic water balance processes in basins of different sizes and on different scales.
ISBN 90-70980-16-9
- II-8 MENDEL, H.G. (1993): Verteilungsfunktionen in der Hydrologie. ISBN 90-70980-19-3

Einige Informationen über die:

INTERNATIONALE KOMMISSION FÜR DIE HYDROLOGIE DES RHEINGEBIETES (KHR)

Gründung

1970 Im Rahmen der Internationalen Hydrologischen Dekade (IHD) der UNESCO.

1975 Fortsetzung der Arbeiten im Rahmen des Internationalen Hydrologischen Programms (IHP) der UNESCO und des Operationellen Hydrologie-Programms (OHP) der WMO.

1978 Unterstützung der Arbeiten der Kommission durch Austausch einer Verbal-Note zwischen den mitarbeitenden Ländern.

Aufgaben

- Förderung der Zusammenarbeit hydrologischer Institutionen und Dienste im Einzugsgebiet des Rheins.
- Durchführung von Untersuchungen über die Hydrologie des Rheingebietes und Austausch der Ergebnisse diesbezüglicher Studien.
- Förderung des Austausches von hydrologischen Daten und Informationen im Rheingebiet (z.B. aktuelle Daten, Vorhersagen).
- Entwicklung von standardisierten Verfahren für die Sammlung und Bearbeitung hydrologischer Daten in den Rheinanliegerstaaten.

Mitarbeitende Länder

Schweiz, Österreich, Bundesrepublik Deutschland, Frankreich, Luxemburg, Niederlande

Arbeitssprachen

Deutsch und Französisch

Organisation

Ständige Vertreter (Sitzungen 2mal pro Jahr) unterstützt von einem ständigen Sekretariat. Die Bearbeitung von Projekten wird von Rapporteurs und internationalen Arbeitsgruppen durchgeführt.

Quelques informations sur la:

COMMISSION INTERNATIONALE DE L'HYDROLOGIE DU BASSIN DU RHIN (CHR)

Institution

1970 Dans le cadre de la Décennie Hydrologique Internationale (DHI) de l'UNESCO.

1975 Poursuite des travaux dans le cadre du Programme Hydrologique International (PHI) de l'UNESCO et du Programme d'Hydrologie Opérationnelle (PHO) de l'OMM.

1978 Appui des travaux de la Commission par l'échange d'une note verbale entre les pays concernés.

Tâches

- Encourager la coopération entre les instituts et les services actifs dans le bassin du Rhin.
- Réalisation d'études hydrologiques dans le bassin du Rhin et échange de résultats des études concernées.
- Encourager l'échange de données et d'informations hydrologiques dans le bassin du Rhin (p.ex. données actuelles, prévisions).
- Elaboration de méthodes standardisées pour la collecte et le traitement des données hydrologiques dans les Etats riverains du Rhin.

Pays participants

la Suisse, l'Autriche, la République Fédérale d'Allemagne, la France, le Luxembourg, les Pays-Bas

Langues de travail

allemand et français

Organisation

Les représentants permanents (réunions deux fois par an) sont soutenus par le secrétariat permanent. Les études sont réalisées par des rapporteurs et des groupes de travail internationaux.

Auswahl der laufenden Arbeiten

»Änderungen im Abflußregime«

- Beschreibung des Einflusses der menschlichen Aktivitäten auf die Rheinabflüsse.
- Bestimmung der Auswirkungen von Bodennutzungs- und Klimaänderungen auf das Abflußregime des Rheins.
- Untersuchungen über Auswirkungen des Waldes auf den Wasserhaushalt.

»Fließzeiten«

- Ermitteln von Fließzeiten und Stofftransport im Rhein zur Verbesserung des Rheinalarmmodells (in Zusammenarbeit mit der IKSR).

»Sediment«

- Verbesserung und Standardisierung der Verfahren zur Messung von Schwebstoffgehalten und Bodentransport des Sediments.
- Beschreibung des Sedimenthaushaltes im Fluß.

»Fortschreibung der Monographie«

- Übersicht hydrologischer Daten über die Perioden 1971-1980 und 1981-1990 als Fortsetzung der im Jahre 1978 veröffentlichten Monographie »Das Rheingebiet«.

Fertiggestellte Arbeiten

sie Publikationsliste, Seite 117

Principaux thèmes en cours

«Changements dans le régime des débits»

- Description de l'impact des activités humaines sur le débit du Rhin.
- Détermination des effets des changements du climat et de l'utilisation du sol sur le régime des débits du Rhin.
- Etude de l'influence de la forêt sur l'hydrologie.

«Temps d'écoulement»

- Détermination des temps d'écoulement et de transport des substances dans le Rhin pour l'amélioration du modèle d'alerte du Rhin (en collaboration avec la CIPR).

«Sédiments»

- Amélioration et standardisation des méthodes pour la mesure des matières en suspension et du charriage de fond.
- Description de la situation de la sédimentation dans le fleuve.

«Actualisation de la Monographie»

- Données hydrologiques sur les périodes 1971-1980 et 1981-1990 complétant celles de la monographie hydrologique »le Bassin du Rhin« publiée en 1978.

Travaux effectués

voir la liste de publications, page 117

Enige gegevens betreffende de:

**INTERNATIONALE COMMISSIE VOOR DE
HYDROLOGIE VAN HET RIJNGEBIED
(CHR)**

Oprichting

1970 In het kader van het Internationaal Hydrologisch Decennium (IHD) van de UNESCO.

1975 Voortzetting van de werkzaamheden in het kader van het Internationaal Hydrologisch Programma (IHP) van de UNESCO en het Operationeel Hydrologisch Programma (OHP) van de WMO.

1978 Ondersteuning van het werk van de Commissie door een nota-uitwisseling tussen de samenwerkende landen.

Taken

- Bevordering van samenwerking tussen hydrologische instituten en diensten in het stroomgebied van de Rijn.
- Uitvoeren van hydrologische studies in het Rijngebied en uitwisseling van de onderzoeksresultaten.
- Bevorderen van de uitwisseling van hydrologische gegevens en informatie in het Rijngebied (bijv. actuele gegevens, voorspellingen).
- Ontwikkeling van standaardmethoden voor het verzamelen en bewerken van hydrologische gegevens in de Rijnsoeverstaten.

Deelnemende landen

Zwitserland, Oostenrijk, Bondsrepubliek Duitsland, Frankrijk, Luxemburg, Nederland

Voertalen

Duits en Frans

Organisatie

Vaste vertegenwoordigers (vergaderingen tweemaal per jaar) ondersteund door een permanent secretariaat. Onderzoeken worden door rapporteurs en internationale werkgroepen uitgevoerd.

Some information on the:

**INTERNATIONAL COMMISSION FOR THE
HYDROLOGY OF THE RHINE BASIN (CHR)**

Foundation

1970 Within the framework of UNESCO's International Hydrological Decade (IHD).

1975 Continuation of activities in the framework of UNESCO's International Hydrological Programme (IHP) and the Operational Hydrology Programme (OHP) of WMO.

1978 Support of the Commission's activities by exchange of a verbal note between the participating countries.

Tasks

- Support of co-operation between hydrological institutes and services active in the catchment area of the Rhine.
- Executing hydrological studies in the Rhine basin and exchange of research results.
- Promoting the exchange of hydrological data and information in the Rhine basin (e.g. current data, forecasts).
- Development of standardized methods for collecting and processing hydrological data in the Rhine riparian states.

Participating countries

Switzerland, Austria, Federal Republic of Germany, France, Luxemburg, the Netherlands

Working languages

German and French

Organization

Permanent representatives (meetings twice a year) supported by a permanent secretariat. Studies are carried out by rapporteurs and international working groups.

Belangrijkste lopende onderzoeken

„Veranderingen in het afvoerregime”

- Beschrijving van de invloed van menselijke activiteiten op de Rijnafvoeren
- Bepaling van de invloed van veranderingen in bodemgebruik en klimaat op het afvoerregime van de Rijn.
- Onderzoek naar de invloed van bos op de waterhuishouding.

„Stroomtijden”

- Bepaling van de stroomtijden en stoftransport in de Rijn ter verbetering van het alarmmodel voor de Rijn (in samenwerking met de IRC).

„Sediment”

- Verbetering en standaardisering van meetmethoden voor gehalten aan zwevend materiaal en bodemtransport.
- Beschrijving van de sedimenthuishouding in de rivier.

„Voortzetting Monografie”

- Overzicht van hydrologische gegevens over de perioden 1971-1980 en 1981-1990 als voortzetting van de in 1978 uitgegeven hydrologische monografie „Het stroomgebied van de Rijn”.

Afgesloten onderwerpen

zie lijst van publikaties, blz. 117

Selection of current subjects

‘Changes in the discharge regime’

- Description of the impact of human activities on the Rhine discharges.
- Determination of the effect of changes in land use and climate on the discharge regime of the Rhine.
- Research into the effects of forest on the hydrology of the basin.

‘Travel times’

- Determination of the travel times and constituent transport in the Rhine for the improvement of the alarm model for the Rhine (in co-operation with CIPR/IKSR).

‘Sediment’

- Improvement and standardization of methods to measure suspended load and bed-load transport.
- Description of sediment characteristics of the river.

‘Continuation of the Monograph’

- Hydrological data for the periods 1971-1980 and 1981-1990 as a continuation of the hydrological monograph ‘The Rhine basin’ published in 1978.

Completed projects

see list of publications, p. 117